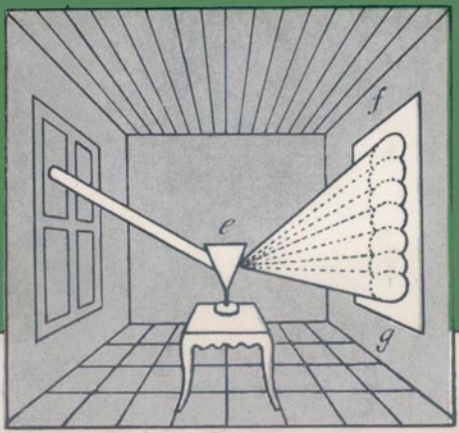
Física para todos Libro 4

A.I.Kitaigorodski

FOTONES Y NÚCLEOS

Editorial Mir Moscú



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Física para todos

Libro 4

A.I.Kitaigorodski

FOTONES Y NÚCLEOS

Traducido del ruso
por K. Steinberg

Editorial Mir Moscú

А. И. Китайгородский

Физика для всех
Книга 4
Фотоны и ядра

Издательство «Наука» Москва

На испанском языке

A NUESTROS LECTORES:

Mir edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros. Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas; literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia ficción. Dirijan sus opiniones a la Editorial Mir, 1 Rizhski per., 2, 129820, Moscú, I-110, GSP, URSS.

Impreso en la URSS
© Издательство «Наука». 1982
© Traducción al español. Editorial Mir. 1985

Indice

Prefacio 7

Capítulo 1. Radiación electromagnética blanda 9
Intercambio de energía por medio de radiación 9. Radiación de los cuerpos incandescentes 12. Teoría de la radiación térmica 18. Espectros ópticos 21. Radiación de los láseres 29. Luminiscencia 40.

Capítulo 2. Instrumentos ópticos 44
El prisma 44. La lente 49. La cámara fotográfica 52. El ojo 57. El polarizador 59. El microscopio y el telescopio 62. Interferómetros 67. Instrumentos a base de láser 78. Fotometría 81. Holografía 85.

Capítulo 3. Radiación electromagnética dura 89
Descubrimiento de los rayos X 89. Análisis estructural por difracción de rayos X 95. Espectro de los rayos X 107. Radiografía de los materiales 122.

Capítulo 4. Generalizaciones de la mecánica 119
Mecánica relativista 119. Partículas cuya velocidad es próxima a la de la luz 133. Mecánica ondulatoria 140. El principio de Heisenberg 144.

Capítulo 5. Estructura de los núcleos atómicos 151
Los isótopos 151. Radiactividad 156. Desintegración radiactiva 161. Reacciones nucleares y el descubrimiento del neutrón 165. Propiedades de los núcleos atómicos 168. Bosones y fermiones 171. La masa y la energía del núcleo atómico 175. Energía de las reacciones nucleares 178. Reacción nuclear en cadena 182.

Capítulo 6. Energía alrededor de nosotros 188
Fuentes de energía 188. El combustible 195. Centrales eléctricas 200. Reactores nucleares 206. Energía termonuclear 215. Rayos solares 220. Energía eólica 226.

Capítulo 7. Física del Universo 230
Medición de las distancias hasta las estrellas 230. El Universo en expansión 237. Teoría general de la relatividad 242. Estrellas de distintas edades 247. Radioastronomía 253. Rayos cósmicos 256.

Tabla de partículas elementales 259

Prefacio

Con este libro, el cuarto, de la serie «Física para todos» terminamos el examen de los fundamentos de física.

¿Qué se entiende por esta palabra indefinida «fundamentos»? Ante todo se trata de las leyes principales sobre las cuales descansa todo el edificio de la física. Su cantidad no es muy grande, de modo que incluso podemos enumerarlas: las leyes del movimiento de la mecánica clásica; las leyes de la termodinámica; las leyes contenidas en las ecuaciones de Maxwell que rigen las cargas, las corrientes y las ondas electromagnéticas; las leyes de la física cuántica y la teoría de la relatividad.

Las leyes de la física, al igual que de todas las ciencias naturales, revisten carácter empírico. Llegamos a éstas por medio de observación y experimentación. El experimento permite establecer una multitud de hechos primarios; la estructuración de la sustancia a partir de átomos y moléculas, el modelo nuclear del átomo, el aspecto corpuscular-ondulatorio de la materia... Tanto la cantidad de leyes principales, como la de hechos y conceptos básicos necesarios para su descripción no es muy grande, en todo caso, es reducida.

Durante los últimos decenios la física se extendió en tal medida que las personas que trabajan en sus diferentes ramas dejan de comprender unas a otras apenas la conversación rebasa los marcos de aquello que las vincula en una sola familia, o sea, rebasa los límites de las leyes y conceptos que forman la base de todos los apartados de la física. Algunos capítulos de la física se han entrelazado estrechamente con la técnica, con otras ramas de las ciencias naturales, con la medicina y hasta con las ciencias humanitarias. No es de extrañar que se hayan conformado como disciplinas independientes.

Es poco probable que alguien discuta que a la exposición de las ramas de la física aplicada debe preceder el examen de las principales leyes y los hechos de esta ciencia. Pero es igualmente

evidente que los diferentes autores, en dependencia de su gusto individual y la estrecha especialidad, cada uno a su manera, seleccionarán y compondrán el material necesario para construir la base de la física. Y dejemos al lector que juzgue sobre una de las posibles variantes de exposición de estas bases.

En los prólogos a los primeros fascículos ya hemos hablado sobre el círculo de lectores de la serie «Física para todos». Estos libros están destinados a los representantes de todas las profesiones los cuales desean recordar la física, formar una idea acerca de su estado actual, apreciar el influjo que ejerce sobre el progreso científico-técnico, así como su significado para la formación de la concepción materialista del mundo. Muchas páginas de la serie despertarán el interés de los maestros de la física, como asimismo de los alumnos que sienten afición a esta disciplina. Cabe pensar que los lectores a quienes «infunden pavor» las fórmulas algebraicas también encontrarán en estos libros algunas cosas interesantes para ellos.

Se sobrentiende que dicha serie de libros no prevé que alguien, valiéndose de la misma, estudie física. Para esta finalidad existen libros de texto.

Según el parecer del autor, el libro «Fotones y núcleos» debe enseñar a los lectores cómo actúan las leyes del campo electromagnético y de la física cuántica al analizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas de diferente longitud. Antes de pasar a la conversación sobre los núcleos atómicos, el lector se enterará de las nociones de la mecánica ondulatoria y de la teoría especial de la relatividad. Y después de exponer los principales hechos referentes a la estructura del núcleo atómico abordaremos el tema, que inquieta la humanidad, acerca de las fuentes de energía en la Tierra. Finalmente, consumaremos nuestra narración con un breve relato sobre la física del Universo.

El pequeño volumen del libro no da la posibilidad de detenernos en muchos temas tradicionales. Lo viejo se vio obligado a ceder su puesto a lo nuevo.

A. I. Kitaigorodski

Capítulo I
Radiación electromagnética blanda

Intercambio de energía por medio de radiación

Denominamos blanda aquella radiación electromagnética cuyas longitudes de ondas se encuentran, de una forma aproximada, en el intervalo desde 0,1 hasta 100 μm. En este caso, tenemos que estipular una cosa más. Hablando sobre la radiación blanda tendremos en cuenta las ondas electromagnéticas que se originan no debido a los procedimientos radiotécnicos. Esta estipulación es necesaria por cuanto empleando métodos puramente radiotécnicos es posible «irrumpir» en el campo de la radiación blanda.

Con bastante frecuencia la radiación blanda se denomina también lumínica. Al hacer uso de este término, no se debe olvidar que la luz visible ocupa solamente un intervalo estrecho de longitudes de ondas que para el ojo humano «medio» se encuentra dentro de los límites de 380 a 780 nm (0,38 . . . 0,78 μm).

Si utilizamos en adelante el término «luz» será tan sólo en el amplio sentido de la palabra, puesto que las leyes válidas para la porción visible del espectro también son ciertas para todos los demás representantes de la radiación blanda.

Cabe recordar también que la radiación con longitudes de onda más cortas que las de la luz visible lleva el nombre de ultravioleta, y la con longitudes de onda más larga se llama infrarroja.

Ahora podemos pasar al tema del párrafo.

Como ya conocemos, existen tres métodos de intercambio de calor. Los correspondientes fenómenos llevan el nombre de conductibilidad térmica, de convección térmica y de radiación térmica. Para investigar el intercambio de energía que tiene lugar a costa de radiación térmica conviene observar cómo se comportan los cuerpos que se encuentran en el vacío (la convección se excluye) a cierta distancia unos de otros (se excluye la conductibilidad térmica o conducción de calor).

La experiencia demuestra que si dos o muchos cuerpos forman un sistema cerrado (el lector recordará que esta circunstancia significa la ausencia de intercambio de energía con los objetos que no entran en el sistema), las temperaturas de estos cuerpos se igualarán. Cada uno de los cuerpos del sistema simultáneamente hace las veces de radiador y de absorbedor. Transcurre un sinnúmero de actos de transición de los átomos y moléculas desde el nivel más alto hacia otro, bajo (en este caso se emite el fotón correspondiente), y del nivel más bajo al superior (el fotón se absorbe). En el intercambio de energía toman parte fotones de todas las energías o, lo que es lo mismo, ondas electromagnéticas de todas las longitudes.

Claro está que el cuerpo no absorbe toda la energía que en éste incide. Puede haber cuerpos que en mayor medida disipan o dejan pasar a través de ellos tales o cuales rayos. Pero semejante circunstancia no cambia el resultado final: el equilibrio térmico, de todos los modos, llega, tarde o temprano.

La condición de equilibrio térmico requiere que la relación entre la energía de absorción y la energía de emisión de la onda de una longitud determinada sea igual para todos los cuerpos. Este teorema lo demostró rigurosamente, en 1860, el físico alemán Gustavo Kirchhoff (1824—1887). Para las temperaturas diferentes la relación puede variar, pero si la temperatura está prefijada la relación será la misma para los fotones de energía dada.

El teorema resulta ser lo suficientemente claro. Se puede decir que ni siquiera necesita una demostración. El sentido de la ley consiste en que el número de fotones absorbidos de la clase dada (es decir, de la energía dada) para el equilibrio térmico es igual al número de fotones emitidos de la misma clase.

De aquí se infiere la siguiente regla: si el objeto absorbe intensamente cualesquiera rayos, entonces, irradia enérgicamente los mismos rayos.

Dicha regla ayuda a predecir las condiciones en que se establece el equilibrio térmico. ¿Por qué bajo la acción de los rayos solares se calentará poco el agua vertida en una botella con paredes plateadas, mientras que el agua encerrada en un frasco de vidrio negro se calentará fuertemente? La explicación es evidente: un cuerpo de color negro absorbe con intensidad los rayos, su energía se invertirá en el aumento de la temperatura y el equilibrio térmico se establecerá después de un fuerte calentamiento. En cambio, la superficie plateada es un magnífico reflector. El objeto absorbe poca energía, el calentamiento se desarrollará tan sólo a ritmo lento y el equilibrio se establecerá a una temperatura baja.

Y ahora, por decirlo así, «invierta» el experimento. Llene los dos frascos de agua caliente y métalos en el refrigerador. ¿En qué caso el enfriamiento será más rápido? Al calentamiento más rápido le corresponderá el más rápido enfriamiento. Cuando se absorbe más energía, mayor cantidad de ésta se entrega.

Son muy impresionantes los experimentos con la cerámica en color. Si el objeto es de color verde, esto significa que el casco absorbe todos los colores excepto el verde. Es que el ojo percibe aquellos rayos luminosos que se reflejan o se disipan por la sustancia. Ahora calentemos el casco hasta incandescencia. ¿Cómo lo veremos? La respuesta ya está en la punta de su lengua: el casco se nos presentará de color violado ya que el violado es el color complementario a verde-amarillo. Se dice de

un color que es complementario a tal o cual, si mezclados estos colores dan el blanco.

El término «colores complementarios» lo introdujo en la ciencia todavía Newton cuando valiéndose de prisma de vidrio descompuso el color blanco en espectro.

Radiación de los cuerpos incandescentes

Se conoce bien que un trozo de metal sometido al calentamiento se pone incandescente, primero al rojo y, luego, al blanco. La mayoría de sustancias químicas no se logra caldear. Estas ya sea que se funden, o bien, se descomponen. De este modo, todo lo que exponemos a continuación se refiere, principalmente, a los metales.

La circunstancia más admirable reside en que el espectro de radiación de todos los cuerpos caldeados es poco específico. La cosa consiste en lo siguiente. De la ley principal acerca de los niveles de energía queda claro que el espectro de radiación y el espectro de absorción del cuerpo deben coincidir. Los metales no son transparentes para toda la zona del espectro de la radiación blanda. De aquí se infiere que también deben irradiar fotones de todas las energías.

También podemos expresarnos de otra forma: el espectro continuo se origina debido a que en un sistema poliatómico los niveles de energía de los átomos se confundieron en bandas que se recubren. En un sistema de esta índole son posibles cualesquiera transiciones de energía, o sea, cualesquiera diferencias de energía de los niveles m-ésimo y n-ésimo $E_m - E_n$, y, por consiguiente, también cualesquiera frecuencias de radiación y absorción. En la fig. 1.1 se representa el aspecto que tiene el espectro de un cuerpo incandescente para varias temperaturas (hemos dado las curvas teóricas válidas para el llamado cuerpo negro).

Hay que señalar que la deducción teórica de la forma de esta curva hecha por Planck en 1900 fue el primer

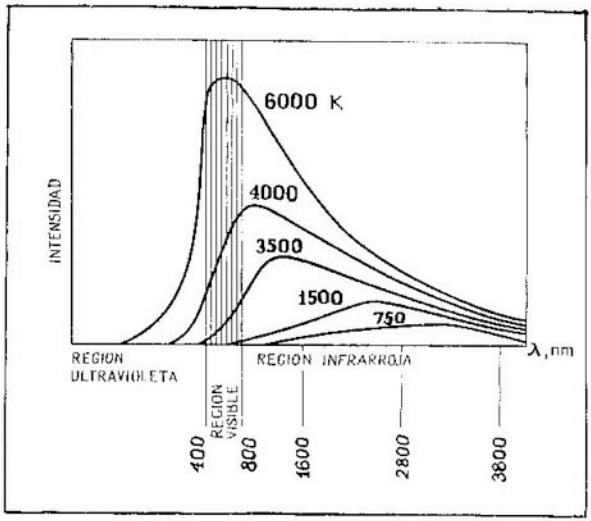


Fig. 1.1.

paso en el proceso de institución de la física cuántica. Para obtener la coincidencia entre la teoría y el experimento Planck tuvo que admitir que la radiación y la absorción de la luz se producen por porciones. Planck no se decidió a hacer el siguiente paso, precisamente, a afirmar que es completamente lícito hablar sobre las partículas de luz, o sea, fotones. Este paso lo hizo Einstein en 1905.

Y solamente en el año 1913 Bohr introdujo el concepto sobre la cuantificación de la energía. En cuanto a la teo-

Max Planck (1858-1947), relevante científico alemán que colocó los cimientos de la teoría cuántica. Al tratar de hallar la expresión matemática que describiera correctamente la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro, Planck mostró que semejante fórmula podía obtenerse introduciendo en la teoría el "cuanto de acción". Planck conjeturó que el cuerpo emite energía por porciones iguales al producto de cierta constante —que más tarde recibió su nombre— por la frecuencia de la luz.

ría lógica y armoniosa de la radiación térmica, su formación debe remontarse al año 1926.

Al principio, discutiremos la forma de estas curvas sólo después hablaremos sobre la teoría. En primer término, prestemos atención a que, a medida que aumenta la temperatura, se acrecienta de modo rápido el área bajo la curva. ¿Qué sentido físico tiene el área barrida por la curva de radiación? Al construir el gráfico semejante al representado en la figura, se dice que por el eje de ordenadas está marcada la intensidad de la radiación para la longitud dada de onda. ¿Pero, qué significa «para la longitud dada de onda»: se tiene en cuenta, digamos, 453 nm o 453,2 nm? O bien, ¿puede ser que 453,257859987654 nm? Espero que para el lector esté claro que, al decir «para la longitud dada de onda» se trata de un intervalo pequeño de longitudes de onda. Por ejemplo, se ponen de acuerdo que éste será un intervalo igual a 0,01 nm. De aquí deriva que el sentido físico lo tiene no la ordenada, sino una columna de 0,01 nm de base. El área de esta columna es igual a la energía radiada por las ondas cuya longitud se halla, por ejemplo, en el intervalo desde 453,25 hasta 453,26 nm. Al dividir en semejantes columnas toda el área que abarca la curva y sumar sus áreas, obtendremos la intensidad total de todo el espectro. En este ejemplo he explicado la operación que los matemáticos denominan integración. De este modo, el área bajo la curva da la intensidad total de la radiación. Resulta que ésta es proporcional al cuarto grado de la temperatura.

En la figura —objeto de nuestra discusión— se ve que con el crecimiento de la temperatura cambia no sólo el área abarcada por la curva, sino también tiene lugar el desplazamiento de su máximo a la izquierda, es decir, a la región ultravioleta.

La relación entre la longitud de onda de la luz, en micrometros, correspondiente a la radiación (absorción) más intensa y la temperatura, en kelvin, se da por medio de

la siguiente fórmula:

$$\lambda_{max} = \frac{2886}{T}.$$

A temperaturas bajas el máximo se encuentra en la región infrarroja. Precisamente debido a esta causa la radiación infrarroja se denomina, a veces, térmica. Un hecho notable es el que disponemos de instrumentos capaces de «percibir» la radiación térmica emitida por los cuerpos cuya temperatura es ambiental o, incluso, inferior a ésta. La técnica moderna sabe «ver» en plena oscuridad. La misma capacidad la poseen algunos animales. Aquí no hay nada extraño pues los rayos infrarrojos, de principio, acusan las mismas propiedades que los visibles.

En particular, no se debe olvidar que cualquier animal es fuente de radiación. A menudo se dice que se puede «sentir» en la oscuridad la presencia de una persona. No es cosa mística. Meramente, aquel que «siente» posee una percepción aguda de los rayos térmicos.

No puedo prescindir de contar al lector una interesante historieta que demuestra que los rayos térmicos deben tenerse en cuenta incluso en aquellas ocasiones en que como fuentes de los rayos térmicos figuran cuerpos no calentados, en la acepción cotidiana de esta palabra. Varios años atrás me pidieron que diese mi opinión acerca de los experimentos realizados por un hombre que se hacía pasar por «mago» capaz de retener el movimiento de un motor a fuerza de su voluntad. Mi misión consistía en hallar para estos experimentos (a los hechiceros del siglo XX les gusta recurrir a la terminología seudocientífica dando a estos experimentos el nombre de telecinesia) una explicación racional.

El esquema del experimento se ilustra en la fig. 1.2. En el árbol de un pequeño motor giraba una aleta y ésta, efectivamente, se paraba cuando el «mago» se sentaba al lado de la caja a la que salía este árbol. Pronto averi-

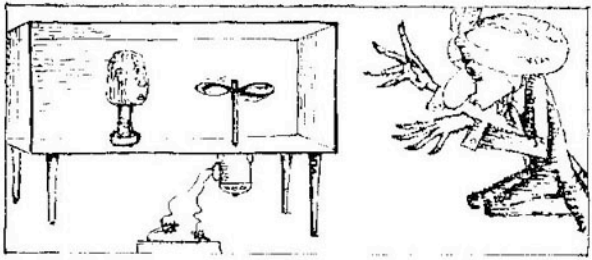


Fig. 1.2.

güé que cualquier persona que se sentaba junto a la caja con el motor ejercía sobre la aleta el mismo influjo. No se paraba el motor como lo afirmaba el «mago», sino, precisamente, la aleta. De este modo, resultó evidente que a la fuerza de cohesión del árbol del motor con la aleta se opone cierta fuerza de otro tipo relacionada con la presencia del hombre.

Demostré que se puede hacer parar la aleta casi instantáneamente si a la pared de la caja se arrima una lámpara eléctrica. Quedó claro que el asunto reside en el calor que irradia el cuerpo humano. Dejé pasar a la caja un chorro de humo de tabaco con lo cual puse de manifiesto que dentro de la caja se engendraban flujos de aire debidos a la convección y dirigidos precisamente de tal modo que impedían la rotación de la aleta. Las mediciones precisas evidenciaron que en el lado de la caja vuelta al hombre se creaba una temperatura que superaba en un grado, aproximadamente, la del lado de la caja alejado del hombre.

Cada uno puede percibir los rayos infrarrojos que emana el cuerpo calentado hasta 60 . . . 70 °C si acerca a éste la palma de la mano. Por supuesto, hay que eliminar la convección térmica. El aire caliente sube, mientras

que usted aproxima la palma de la mano desde abajo. En este caso se puede estar seguro de que ha percibido precisamente los rayos térmicos.

Antes de despedirnos de los rayos térmicos vamos a explicar por qué el paso desde la lámpara eléctrica de incandescencia con el filamento de carbón hacia la lámpara moderna con el filamento de volframio resultó ser un gran progreso. El quid del asunto reside en que el filamento de carbón puede caldearse hasta la temperatura de 2100 K, mientras que el de volframio, hasta 2500 K. ¿Cuál es la razón de que estos 400 K son tan importantes? Esta razón estriba en que la finalidad de una lámpara de incandescencia no es calentar, sino proporcionar luz. Por consiguiente, hace falta lograr una situación tal que el máximo de la curva corresponda a la radiación visible. Como se ve del gráfico, sería ideal disponer de un filamento que soporte la temperatura de la superficie del Sol, o sea, 6000 K. Pero incluso el paso desde 2100 hacia 2500 K aumenta la parte de energía que recae en la radiación visible desde 0,5 hasta 1,6%.

Teoría de la radiación térmica

Si el sistema de los cuerpos que irradian y absorben está cerrado, entonces, el «gas» de los fotones con cuya ayuda los cuerpos intercambian la energía debe encontrarse en equilibrio con los átomos progenitores de estos fotones. El número de fotones con la energía $h\nu$ depende del hecho de cuántos átomos se encuentran en el nivel E_1 y cuántos en el nivel E_2. Durante el equilibrio estos números son invariables.

Sin embargo, el equilibrio reviste carácter dinámico por cuanto se desarrollan, simultáneamente, tanto los procesos de excitación, como de radiación. De cierta manera, ya sea debido a la colisión con otra partícula, o bien, gracias a la absorción del fotón llegado desde fuera, el átomo o el sistema atómico se traslada a un

nivel alto. En este estado de excitación el sistema permanece cierto tiempo indefinido (que, habitualmente, se mide en fracciones de segundo), y luego, se retorna al nivel bajo. Dicho proceso lleva el nombre de radiación espontánea. El átomo se comporta como una bolita que se deja retener, con dificultad, en el vértice puntiagudo de una prominencia de perfil complejo: un soplo casi imperceptible, y el equilibrio resulta alterado. La bolita se desliza en un hoyo y, además, en la mayoría de los casos, en el más profundo, del cual ésta puede sacarse tan sólo golpeándola fuertemente. Acerca del átomo que se deslizó al más bajo peldaño se dice que el mismo se encuentra en estado estable.

Cabe recordar, sin embargo, que, además de las posiciones «en el vértice» y «en el hoyo profundo» existe también una situación intermedia: la bolita puede encontrarse en un valle poco profundo de donde ésta puede extraerse si no fuese con un soplo ligero, por lo menos, mediante un ligero empujón. Semejante posición se denomina metaestable. De este modo, además del nivel de excitación y el estable se da también un tercer tipo de nivel de energía, el metaestable.

Resumiendo, podemos decir que las transiciones tendrán lugar en ambos sentidos. Ora uno, ora otro átomo se trasladarán al nivel superior. Transcurrido un instante descenderán al nivel bajo emitiendo luz. Pero, al mismo tiempo, otros átomos recibirán energía, ascendiendo a los niveles superiores.

La ley de la conservación de la energía exige que el número de transiciones desde arriba abajo sea igual al de las transiciones desde abajo arriba. ¿Qué es lo que determina el número de transiciones hacia arriba? Se trata de dos factores: en primer término, es el número de átomos que se hallan en el piso inferior y, en segundo término, es el número de impactos que los harán ascender al piso superior. ¿Y el número de las transiciones hacia abajo? Este se determina, como es lógico, por el número

de átomos ubicados en el piso superior y, al parecer, no depende de ningún otro factor. Precisamente, ésta fue, al principio, la opinión de los físicos teóricos. No obstante, los cabos se les ataban mal. El número de transiciones hacia arriba dependiente de dos factores se acrecentaba con la temperatura mucho más rápidamente que el número de transiciones hacia abajo que dependía tan sólo de un factor. El modelo evidente, en apariencia, llevaba a un absurdo. Resultaba que, a la corta o a la larga, todos los átomos se empujarán al nivel superior: el sistema de átomos se encontrará en estado inestable y no habrá radiación.

Precisamente, esta deducción imposible la pesó Einstein en 1926 de las elucubraciones de sus predecesores. Por lo visto, cierta circunstancia más influía en las transiciones de los átomos desde el piso superior hacia el inferior. No había otro remedio, sino conjeturar que además de la transición espontánea al nivel bajo existía también una transición forzada.

¿Qué es la radiación forzada? He aquí de qué se trata. El sistema se halla en el nivel superior. Del nivel inferior lo separa la diferencia de energías $E_2 - E_1 = h\nu$. Resulta que si sobre el sistema incide un fotón de energía igual a $h\nu$, éste obligará el sistema a pasar al nivel inferior. En este caso, el propio fotón incidente no se absorberá, sino proseguirá su camino en la misma dirección acompañado de otro fotón, un fotón nuevo engendrado por el primero y completamente idéntico a éste.

No hace falta buscar lógica en este razonamiento. Fue una revelación, una idea súbita... Y el experimento debe juzgar si es acertada. Valiéndose de la hipótesis acerca de la emisión forzada (estimulada) se consigue deducir una fórmula cuantitativa que da el gráfico de radiación en función de la longitud de onda para un cuerpo caliente. La teoría coincide de un modo brillante con la experiencia y por esta razón justifica la hipótesis enunciada.

Es interesante que las conclusiones prácticas derivadas del hecho de existir la emisión estimulada y que llevaron al descubrimiento de los láseres, sólo se sacaron al cabo de muchos años.

Espectros ópticos

Hablando en general, cualquier cuerpo es fuente de radiación electromagnética blanda. Por medio de un espectrógrafo, o sea, de un instrumento cuya parte principal la constituye un prisma o una red de difracción, la luz se descompone en espectro. El espectro puede ser continuo, así como de bandas y de rayas. Los espectros de los cuerpos sólidos incandescentes se parecen muchísimo unos a otros. Además, tan sólo una cantidad pequeña de sustancias puede caldearse hasta luminosidad. Se sobrentiende que una cosa rara es un líquido incandescente. Una amplia información la deparan los espectros de radiación de los gases. Tales son los espectros de los rayos que llegan hacia la Tierra de las lejanas estrellas. Los rayos luminosos de materia sideral que se encuentra en estado gaseoso nos han suministrado importantísimos datos referentes a la estructura del Universo.

En las condiciones terrestres no es difícil crear espectros de radiación de los átomos. A los átomos se les obliga a emitir luz dejando pasar corriente a través del gas, o bien, calentando el gas. Cabe señalar que por medio de este método es posible estudiar únicamente los espectros de los átomos, pero no los espectros de las moléculas. Antes de que el gas se ponga luminiscente, las moléculas se desintegrarán en átomos. Esta es la razón de que si al investigador le interesan líquidos o sólidos, éste estudia los espectros de absorción. En fin de cuentas, el cuadro se determina por el sistema de niveles de energía. Las transiciones desde arriba abajo o desde abajo arriba portan datos idénticos. Hay que actuar de la forma más conveniente.

Los espectros constituidos por líneas nítidas aisladas pueden obtenerse tan sólo de un gas o de una solución diluida. En el libro 2 hemos hablado de que el comportamiento de las moléculas disueltas recuerda en muchos aspectos el de un gas. Esta tesis resulta válida también para la espectroscopia óptica. Lamentablemente, el disolvente ejerce su influencia en el carácter del espectro, pero, al comparar la forma de los espectros de las moléculas disueltas en diferentes sustancias se puede tomar en consideración dicha influencia, «sonsacando» del experimento la dactiloscopia de la molécula disuelta.

El hecho de obtener el espectro característico no significa, ni mucho menos, establecer el sistema de los niveles de energía de la molécula. No obstante, para muchos fines prácticos esto tampoco se requiere. Si se dispone de un álbum en el cual se han recogido datos referentes a los espectros (es decir, la lista de líneas espectrales y de sus intensidades o las curvas de intensidad en función de la frecuencia) de cierta familia de sustancias químicas, entonces, tomando el espectro de la sustancia desconocida y comparando el cuadro obtenido en el experimento con los cuadros del álbum, reconocemos la sustancia de una manera completamente análoga a como por el dibujo de los surcos en el dedo se identifica un delincuente.

En los últimos tiempos el análisis espectral óptico ha obtenido un rival en la persona de radioespectroscopia. Los métodos radioespectroscópicos, por ahora (y este «por ahora», a todas luces, durará poco), son todavía inferiores a los ópticos en cuanto a su sensibilidad, pero, en cambio, superan enormemente los métodos ópticos por las posibilidades que brindan para la identificación y el análisis cuantitativo de las mezclas de sustancias.

En nuestra tarea no entra el conocimiento de los espectros concretos de las sustancias. Es suficiente dar a conocer al lector el cuadro de los niveles de energía de

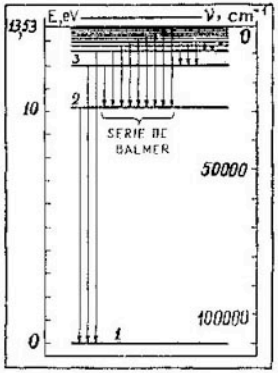


Fig. 1.3.

los átomos de hidrógeno y el esquema de principio de los niveles de energía de una molécula libre.

En la fig. 1.3 está representado el sistema de los niveles de energía del hidrógeno. Quiero centrar su atención en la condensación característica de los niveles a medida que aumenta la distancia desde la raya cero.

A propósito, no conviene pensar que el cero designado en el esquema es un cero «auténtico». Se da por sentado que el átomo de hidrógeno no excitado posee una energía determinada. Pero, puesto que en los espectros se manifiestan las diferencias de energía, es cómodo realizar el cómputo desde la raya inferior. Según sea la fuerza del «capirotazo» recibido el átomo puede subir a cualesquiera de los «pisos», permanecer un breve plazo en este estado no equilibrado y, luego, mediante cualesquiera de las dos formas posibles (radiación espontánea o radiación estimulada) descender.

El espectro naciente conviene dividirlo en una sucesión de «series». Cada serie está subordinada a su nivel

Niels Bohr (1885-1962), célebre físico danés. Creó el primer modelo cuántico del átomo, descubriendo de este modo la ley de la cuantificación de la energía. Participó activamente en la elaboración de los principios de la mecánica cuántica. Demostró la inaplicabilidad, de principio, al micromundo de los conceptos idóneos para describir el comportamiento de los cuerpos macroscópicos. Hizo una gran aportación a la teoría de la estructura del núcleo atómico.

inferior. En la zona visible se encuentra la llamada serie de Balmer. La explicación de ésta constituyó el primer triunfo de la teoría de la estructura atómica de Niels Bohr. No todas las transiciones de energía son equiprobables. Cuanto más alta es la probabilidad de la transición tanto más intensa es la línea correspondiente. También existen transiciones prohibidas.

Para los físicos teóricos resultó ser un éxito brillante el que supieron dilucidar, de un modo exhaustivo, el espectro de los átomos de hidrógeno, resolviendo la celebre ecuación de la mecánica cuántica deducida en 1926 por Erwin Schrödinger.

Los campos externos influyen sobre los espectros atómicos. Las líneas se desdoblan en varias componentes por la acción del campo eléctrico (efecto Stark) y por la acción del campo magnético (efecto Zeeman). No nos proponemos explicar estos interesantes fenómenos. Advertiremos tan sólo que se logró comprender algunos de éstos únicamente después de que Goudsmit y Uhlenbeck sugirieran que el electrón poseía el espín. En el libro 3 ya hablamos cómo el espín se descubre directamente en los experimentos.

Y, por fin, la última observación concerniente al cuadro de los niveles de energía. Vemos que el límite a que se acercan los niveles se designa con el número 13,53. ¿Qué significa este número? Es la tensión de ionización. Si se multiplica la carga del electrón por la magnitud de esta tensión en voltios, obtendremos la magnitud del trabajo que se debe invertir para arrancar el electrón al núcleo, en otras palabras, para destruir el átomo de hidrógeno.

Los espectros de los átomos se engendran como resultado de transiciones electrónicas. Apenas pasamos de los átomos a la molécula, de inmediato, surge la necesidad de tomar en consideración dos componentes más de energía. La molécula puede girar y los átomos de la molécula pueden realizar oscilaciones unos respecto a otros. Todos

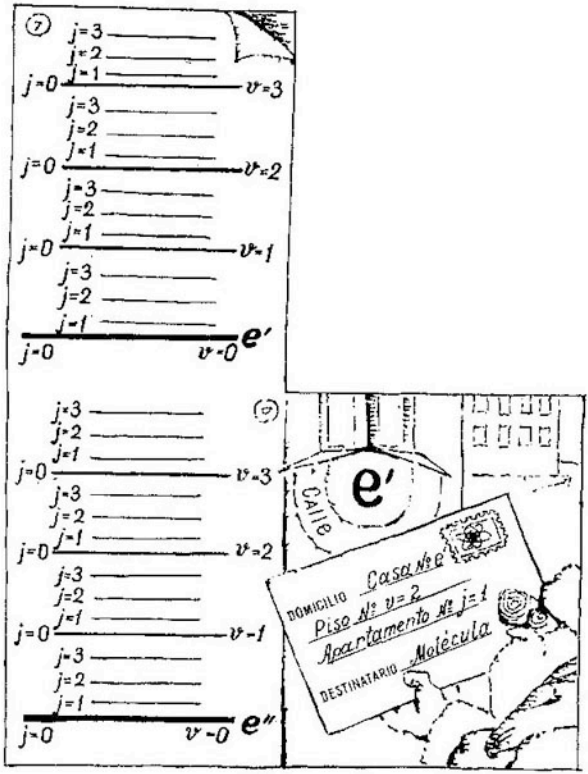

⑦
j=3
j=2
j=1
j=0
v=3
v=2
v=1
v=0
e'
⑦
e'
CALLE
DOMICILIO Casa Nº e'
Piso Nº v=2
Apartamento Nº j=1
DESTINATARIO Molécula
e''

Fig. 1.4.

estos tipos de energía también se cuantifican, éstos pueden tener solamente determinados valores discretos (discontinuos). De este modo, el estado energético de la molécula se define por el estado de su nube electrónica (nivel electrónico), el estado del movimiento oscilatorio (nivel vibracional) y el estado de rotación (nivel rotacional). Se debe operar con tres tipos de datos, por decirlo así, el número de la casa, del piso y del apartamento.

Pero, ¿qué desempeña el papel del piso y qué del apartamento? ¿Cuáles de los niveles de energía están separados por intervalos grandes y cuáles por pequeños? A estas preguntas contesta la fig. 1.4. En el esquema se muestran dos niveles electrónicos e' y e'' (números de las casas). Los pisos —los niveles vibracionales— están designados con la letra v, y los números de los apartamentos —niveles rotacionales— con la letra j. Es verdad que no está adoptada semejante numeración de las casas. Como se sabe, se utiliza la numeración continua de los apartamentos, mientras que nosotros, al describir los espectros de la molécula, numeramos los apartamentos en cada piso comenzando por cero. Como ve el lector, los más pequeños son los intervalos entre los niveles rotacionales, y la mayor es la diferencia entre los niveles electrónicos (e' y e'').

Supongamos que para una molécula son posibles niveles electrónicos que se hallan a 100, 200, 300) ... unidades de energía; niveles vibracionales, a 10, 20, 30 ... unidades, y niveles rotacionales, a 1, 2, 3 ... unidades; entonces, una molécula que se encuentra en el segundo nivel electrónico, primer nivel vibracional y tercer nivel rotacional tendrá la energía de 213 unidades.

Así pues, la energía de la molécula puede prefijarse en forma

$$E = E_{el} + E_{vibr} + E_{rot}.$$

La frecuencia de la luz emitida o absorbida siempre corresponderá a la diferencia (signo Δ) de dos niveles, es decir,

$$\nu = \frac{1}{h}(\Delta E_{el} + \Delta E_{vibr} + \Delta E_{rot}).$$

Quisiera destacar aquellas transiciones en las cuales varía tan sólo una «especie» de energía. En la práctica, esto es posible sólo para las transiciones de rotación, y comprenderemos con facilidad el motivo de ello.

Comencemos a investigar la absorción de las ondas electromagnéticas por un grupo de moléculas desde las ondas más largas, es decir, desde porciones pequeñas de energía $h\nu$. La molécula no absorberá hasta que la magnitud del cuanto de energía se haga igual a la distancia entre dos niveles más cercanos. Aumentando paulatinamente la frecuencia llegaremos hasta los cuantos capaces de elevar la molécula de un peldaño «rotacional» al otro. Como demuestra la experiencia esto tendrá lugar en la zona de microondas (el límite de la banda de radiofrecuencias), o bien, expresándolo de otra forma, en la región del espectro infrarrojo lejano. Las longitudes de ondas del orden de 0,1 a 1 mm se absorberán por las moléculas. Aparecerá un espectro netamente rotacional.

Nuevos fenómenos se originarán cuando hagamos incidir sobre la sustancia una radiación poseedora de cuantos de energía suficientes para trasladar la molécula de un nivel vibracional al otro. Sin embargo, nunca obtendremos un espectro puramente vibracional, o sea, una serie de transiciones tal en que se conserve el número del nivel rotacional. Por el contrario, las transiciones de un nivel vibracional al otro afectarán diferentes niveles rotacionales. Digamos, la transición del nivel vibracional cero (el inferior) al primero puede consistir en la subida desde el tercer nivel rotacional hacia el segundo, o desde el segundo hacia el primero, etc. De este modo se producirá el espectro vibracional-rotacional. Lo obser-

varemos en la luz infrarroja (de 3 a 50 μm). Todas las transiciones desde un nivel vibracional hacia el otro se diferenciarán poco en lo que respecta a su energía y darán en el espectro un grupo de líneas muy próximas. Para una resolución pequeña estas líneas se confundirán en una banda. Cada banda corresponde a una transición vibracional determinada.

Iremos a parar a una nueva región espectral, la de luz visible, cuando la energía del cuanto se haga suficiente para trasladar la molécula de un nivel electrónico al otro. Se sobreentiende que tampoco aquí son posibles tanto las transiciones puramente electrónicas, como las electrónico-vibracionales. Se originarán transiciones complejas en las cuales la transición energética viene acompañada de «mudanza» tanto de la «casa», como del «piso» y del «apartamento». Como quiera que la transición vibracional-rotacional representa una banda, resulta que el espectro en la región visible será prácticamente continuo.

Los espectros característicos de los átomos y de las moléculas durante largos años han desempeñado (y siguen desempeñando hoy en día) el modesto papel de ayudantes cuando se trataba de la determinación de la estructura química y la composición de las sustancias. Sólo hace muy poco en la esfera de espectroscopia se han desarrollado acontecimientos revolucionarios.

Radiación de los láseres

Los primeros treinta años de nuestro siglo transcurrieron bajo el signo de éxitos fantásticos de la física teórica. Durante estos años se descubrieron las leyes tan importantes de la naturaleza como las de la mecánica de las grandes velocidades, las de la estructura del núcleo atómico y las de la mecánica cuántica. Las cuatro décadas que siguieron a estos años demostraron éxitos no menos fenomenales en el campo de aplicación de la teoría a la

práctica. En el curso de estos años la humanidad aprendió a sacar energía de los núcleos atómicos, obtuvo para su disposición los transistores semiconductores —hecho que dio lugar a un cambio radical en la radiotecnia y condujo a la creación de las máquinas electrónicas calculadoras— y dominó la técnica de láser. Estas tres aplicaciones, hablando con propiedad, redundaron en los eventos que recibieron el nombre de revolución científico-técnica.

En este párrafo hablaremos de los láseres. Vamos a recapacitar sobre las circunstancias que no nos permiten, al obrar empleando métodos tradicionales, crear un intenso haz dirigido de luz.

La luz más potente acumulada en un haz estrecho hasta el límite, diverge y pierde su intensidad con la distancia. Y tan sólo en la novela de ciencia-ficción de Alexéi Tolstói el protagonista inventa un «hiperboloide», aparato que permite generar rayos capaces de quemar, cortar y transportar a grandes distancias colosal energía. Por supuesto, es posible fabricar un espejo cóncavo que crea un haz paralelo de luz. Con este fin hay que disponer en el foco del espejo una fuente puntual. Pero la fuente puntual no es sino una abstracción matemática. Bueno, que no sea puntual, sino, simplemente, pequeña. Sin embargo, incluso en el caso de caldear la bolita hasta 6000 K (ningún material soporta temperatura más alta), obtendremos un haz de luz de intensidad mísera. Y apenas procedamos a aumentar las dimensiones de la fuente, inmediatamente, en lugar del haz paralelo obtendremos un abanico de «hilos» luminosos, y la intensidad del rayo del proyector irá disminuyendo rápidamente con la distancia.

De este modo, resulta que el primer obstáculo en el camino de la creación de un rayo intenso es el hecho de que los átomos radian luz en todas las direcciones. Es el primer obstáculo, mas no el último. Los átomos y las moléculas radian, por decirlo así, sin ponerse de acuerdo

entre sí. Por esta causa, los rayos que parten de diferentes átomos emprenden el viaje de una forma no coordinada, sin esperar unos a otros. Esta circunstancia conduce a que las radiaciones de los distintos átomos no coincidan por su fase. Y siendo así, los rayos procedentes de diferentes átomos, con frecuencia, se aniquilarán recíprocamente. Lo último, como recordará el lector, tiene lugar cuando la cresta de una onda se corresponde con la depresión de la otra.

Se logra superar todos estos obstáculos al crear, precisamente, la radiación de láser. La palabra «láser» no es sino una abreviatura de la denominación inglesa: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, lo que significa: amplificación de la luz por medio de radiación estimulada.

La idea se forma de varios elementos. En primer lugar, recordamos que a la par de radiación espontánea existe la estimulada. Como ya hemos dicho, esta forma de radiación aparece cuando el fotón de la luz se encuentra con un átomo excitado. Si la energía de excitación del átomo es exactamente igual a la del fotón, entonces, este último obliga al átomo a desexcitarse. El átomo pasa a un nivel más bajo radiando un fotón. Una particularidad admirable de la radiación estimulada consiste en que este fotón será idéntico a aquel que lo ha engendrado, y no sólo en lo que respecta a su energía: se pondrá en marcha teniendo la misma fase y siguiendo la misma dirección.

El segundo elemento de la idea consiste en lo siguiente. Si el sistema de los átomos que emiten una radiación se encierra en un tubo cuyos fondos se encuentran a una distancia determinada uno del otro y pueden hacer de espejos para aquellos fotones que nos interesan, estamos en condiciones de reunir poco a poco en este recipiente, a costa de los viajes de los fotones por aquí y por allá, una multitud de fotones engendrados por los átomos excitados en igual medida.

El tercer elemento de la idea reside en retener los átomos para un plazo prolongado, en la medida de lo posible, en estado excitado y, a continuación, después de semejante «bombeo», obligar a todos los átomos a desexcitarse simultáneamente. La realización de la idea del láser, o sea, la multiplicación de un fotón y la obtención de miles de millones de fotones idénticos, indistinguibles por sus propiedades, debe llevar a la generación de un rayo de luz de una intensidad sin precedente. Un haz de esta índole se ensancharía en ínfimo grado y a la sección transversal del rayo correspondería una energía enorme.

Pero, ¿cómo conseguir este objetivo? Durante largos decenios nadie pudo sugerir idea alguna. En los años 30, V. A. Fabrikant ya promovió importantes conjeturas sobre el particular, y más tarde, los persistentes esfuerzos de los futuros laureados con el Premio Nobel, los científicos soviéticos A. M. Prójorov y N. G. Básov y el físico norteamericano Ch. Townes, condujeron a la creación de los láseres.

Supongamos que el sistema posee dos niveles de energía. La mayoría de los átomos o moléculas se encuentra en el nivel inferior. Los impactos térmicos pueden para un corto plazo trasladar la molécula al nivel superior. Pero semejante situación no puede durar un largo rato: la molécula se desexcitará. En este caso, la mayoría aplastante de los átomos pasará al nivel inferior y lo hará de manera espontánea. En cuanto a transiciones estimuladas al nivel inferior éstas ocurrirán raras veces, puesto que el número de partículas excitadas es pequeño.

Ahora supongamos que se logró hallar una sustancia cuyos átomos poseen tres niveles de energía designados en la fig. 1.5 con las cifras *1*, *2* y *3*, respectivamente. La distancia *1—3* corresponde a la frecuencia de radiación de la luz verde, y la distancia *1—2*, a la frecuencia de la luz roja. Sea que la probabilidad de transición desde el nivel *3* hacia el nivel *2* es miles de veces mayor que la frecuencia del paso del nivel *2* al nivel *1*. Vamos a irra-

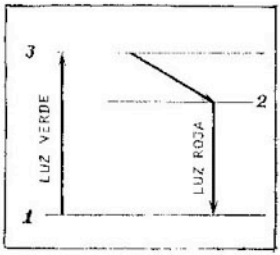


Fig. 1.5.

diar la sustancia con luz verde. Los átomos se elevarán al tercer piso, mediante transiciones espontáneas se trasladarán al nivel *2* y se retendrán en este nivel. Dicha transición se denomina transición sin radiación (transición Auger). La energía liberada se transforma en energía vibracional de los átomos. Continuemos fantaseando, imaginándonos que se logró trasladar la mayoría de los átomos al nivel *2*. Hemos conseguido la inversión de la densidad de los átomos en los niveles, es decir, una densidad «anormal». Los niveles superiores *2* están «poblados» más densamente que los inferiores *1*, fenómeno que resulta imposible cuando el proceso lo rige tan sólo el movimiento térmico.

A pesar de todo, la transición del nivel *2* al nivel más bajo *1* comienza a realizarse. El fotón correspondiente encontrará en su camino otros átomos que están en el nivel excitado *2*. Semejante encuentro conducirá no a la absorción, sino a la creación de un nuevo fotón. Al primer fotón *2—1* casualmente formado se unirán fotones análogos de radiación estimulada.

Surge el flujo de fotones *2—1*. Todos estos fotones serán exactamente idénticos y crearán un rayo de enorme intensidad.

Los investigadores cuyos nombres acabamos de mencionar lograron reproducir precisamente este proceso.

Desde el punto de vista histórico, primero fue creado el láser a rubí. El esquema de ecuaciones representado en la figura justamente caracteriza el rubí con impureza de átomos de cromo.

Para crear un láser es necesario disponer de una fuente de excitación que realiza el «bombeo» del mismo, es decir, traslada los átomos al nivel superior.

En el caso de que como fuente de radiación de láser interviene un cuerpo sólido, este último se fabrica en forma de cilindro cuyas bases desempeñan el papel de espejos. Cuando se trata de líquidos o de gases se confecciona un tubo con espejos junto a la base de la columna. Al realizar el avance micrométrico de los espejos y fijar de este modo la longitud de la columna, se pueden ponerse en buenas condiciones solamente aquellos fotones cuyo número entero de longitudes de onda cabe a lo largo de la longitud de la columna. Tan sólo en este caso todas las ondas se suman.

La particularidad principal del láser consiste, tal vez, en la posibilidad de crear un flujo filiforme de radiación. Prácticamente, el rayo de láser puede tener cualquier sección transversal. Desde el punto de vista técnico este objetivo se consigue haciendo viajar el rayo por un capilar estrecho de vidrio de una longitud lo suficientemente grande. Los fotones que se desplazan formando un ángulo con el eje del capilar no tomarán parte en el proceso de multiplicación de los fotones. La cavidad de resonancia (o sea, los espejos que reflejan los fotones ora en una dirección, ora en otra en el período de trabajo del láser en que se verifica el bombeo de los átomos) multiplica sólo los fotones de una dirección. En algunos casos, cuando la divergencia angular del haz del orden de un grado no satisface, en el camino del rayo puesto en libertad se coloca, además, una lente complementaria.

La instalación de láser, cuando se trata de la creación de grandes potencias, es una obra ingenieril compleja. En la columna se engendra el impulso primario, seguida-

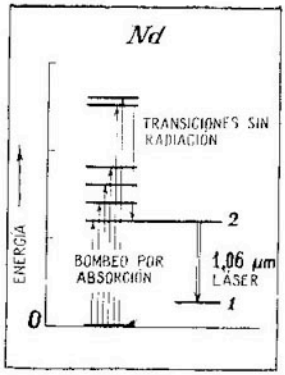


Fig. 1.6.

mente éste puede enviarse a los amplificadores cuyo principio de trabajo es el mismo que el de la columna primaria, pero cuyo bombeo es independiente de dicha columna. No vamos a retenernos en estos detalles. Lo que nos interesa son los principios físicos del bombeo y de la creación de la radiación de los láseres. Y éstos pueden ser esencialmente distintos, como lo demuestran las figs. 1.6—1.8 con los esquemas de la acción de los láseres empleando los cuales se obtienen hoy en día los rayos de potencia máxima.

En la fig. 1.6 se representa el esquema del llamado láser a neodimio. El nombre puede dar lugar a un error. El cuerpo del láser lo forma no el metal neodimio, sino el vidrio común y corriente con impureza de neodimio. Los iones de los átomos de neodimio están distribuidos caóticamente entre los átomos de silicio y de oxígeno. El bombeo se realiza con las lámparas-relámpago. Las lámparas producen la radiación dentro de los límites de las longitudes de onda desde 0,5 hasta 0,9 μm. Aparece una

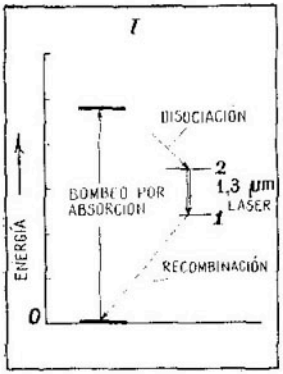


Fig. 1.7.

banda ancha de estados de excitación. Esta banda viene representada de una forma absolutamente convencional por medio de cinco rayas. Los átomos realizan transiciones sin radiación al nivel superior de láser (en el esquema en cuestión, así como en otros dos esquemas está marcado con la cifra *2*). Cada transición aporta diferente energía que se transforma en energía vibracional de toda la «rejilla» de los átomos.

La radiación de láser, es decir, la transición al nivel inferior vacío marcado con la cifra *1* tiene la longitud de onda igual a 1,06 μm.

La transición del nivel *1* al nivel principal representado por medio de la línea de trazos «no trabaja». La energía se desprende en forma de radiación no coherente.

El láser a neodimio permite obtener una potencia fantástica igual a 10^{12} W. La energía se libera en impulsos cuya duración es de 0,1 ns.

Llegó a ser su rival joven el láser que utiliza las transiciones en los átomos excitados de yodo (fig. 1.7). La

sustancia activa es el gas C_3F_7I. También aquí para el bombeo se utilizan las lámparas-relámpago, pero los procesos físicos son distintos. Para el bombeo se hace uso de la luz ultravioleta con la longitud de onda de 0,25 μm. Por impacto de esta radiación tiene lugar la disociación de las moléculas. ¡Resulta admirable el hecho de que los átomos de yodo, al desprenderse de la molécula, se presentan en estado de excitación! Como ve el lector, se trata ya de un método completamente distinto para alcanzar la inversión de la densidad de población. La transición de trabajo $2 \rightarrow 1$ conduce a la radiación de láser con la longitud de onda de 1,3 μm, después de lo cual tiene lugar la reunificación del átomo de yodo con el radical molecular.

Probablemente, el lector habrá oído que se emplean ampliamente los láseres a helio y neón. Con su ayuda se obtiene un haz infrarrojo bastante fuerte con la longitud de onda de 1,13 μm. Estos láseres no se cuentan entre los recordistas en cuanto a su potencia. Por esta razón ofrecemos el esquema de los niveles para otro láser que trabaja a base de la mezcla de nitrógeno y dióxido de carbono (fig. 1.8).

Pero antes de pasar a su descripción es necesario contestar a la pregunta natural: ¿por qué hace falta utilizar la mezcla de gases? La respuesta es como sigue: unos átomos y moléculas resultan más fáciles de excitar, y otros, más fáciles de desexcitar. De este modo, en el láser que trabaja a base de una mezcla se bombean de energía, principalmente, las partículas de una especie, por colisiones éstas transfieren la energía a otros átomos o moléculas y estos últimos ya engendran el rayo de láser.

Están en uso sistemas que constan de más de dos gases. En particular, en el láser en que el papel básico pertenece al nitrógeno y al dióxido de carbono, es racional utilizar, además de estas dos sustancias, diferentes adiciones, incluyendo helio.

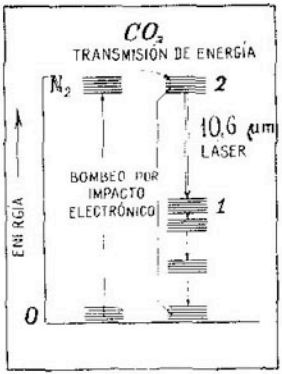


Fig. 1.8.

El bombeo del láser en que «trabajan» las moléculas de CO_2 se efectúa por un procedimiento que se distingue de los dos descritos. La mezcla de los gases se introduce en un tubo de descarga de gases y se suministra una tensión lo suficientemente alta como para lograr que el sistema pase al estado de plasma. Los electrones de movimiento rápido excitan oscilaciones de las moléculas de nitrógeno. El esquema representa el salto de semejante molécula al piso superior. Es importante qué tensión está aplicada a los electrodos. La energía óptima para excitar las moléculas de nitrógeno es la de cerca de 2 eV.

La molécula de nitrógeno sólo hace las veces de mediadora. Esta misma, de por sí, no da radiación y la energía recibida de los electrones la transfiere a la molécula de CO_2 trasladándola al nivel superior de láser.

Los niveles superiores de láser *2* son los «apartamentos del tercer piso» de las moléculas de CO_2. El tiempo de vida de la molécula de gas en el nivel superior de láser es de cerca de 0,001 s. No es poco, ni mucho menos, y la

molécula tiene una probabilidad bastante grande de encontrarse con un fotón de energía adecuada que la obligará a «hospedarse» un piso más abajo.

Cabe señalar que las transiciones «entre los apartamentos» son mucho más frecuentes que las entre «pisos». El tiempo de vida en el nivel rotacional se mide en diezmillonésimas fracciones de segundo. Esta circunstancia favorable lleva a que la población de los apartamentos de cada piso puede considerarse estable. Esta es la causa de que con la ayuda del procedimiento técnico a que nos hemos referido, o sea, creando una distancia adecuada entre los espejos, se logra aislar una transición determinada, por ejemplo, desde el apartamento sexto del tercer piso al apartamento quinto del segundo.

El diseñador del láser debe disponer de datos exhaustivos acerca del tiempo de existencia del átomo en uno u otro subnivel y de las probabilidades de la transición. Entonces, podrá elegir la radiación óptima de la mezcla gaseosa dada. El láser que trabaja a base del dióxido de carbono se sintoniza, habitualmente, para la longitud de onda de 10,5915 μm.

Para que el láser funcione bien es necesario que las moléculas no se retengan en el nivel inferior de láser. Por decirlo así, en cuanto uno ha terminado su asunto debe ceder el lugar a otro. Bueno, siendo la presión igual a 1 mm de Hg las moléculas de dióxido de carbono experimentan 100 colisiones por segundo, despojando el nivel. Las cifras correspondientes en presencia de helio y agua son de 4000 y 100 000, respectivamente. La diferencia es enorme.

Eligiendo aditivos adecuados al dióxido de carbono se puede influir de una manera sustancial en la potencia del aparato. Parece que los especialistas consideran que precisamente un láser de esta índole merece una medalla de oro.

El láser que trabaja con CO_2 da un haz que puede enfocarse sobre un área de 0,001 cm^2, con la intensidad de

1000 kW/cm² para el régimen permanente y la de 1 000 000 kW/cm² para el régimen de impulso, siendo la duración del impulso igual a 1 ns.

La búsqueda de materiales apropiados para los láseres es, en cierto sentido, un arte. Hace falta poseer buena intuición, inventiva y memoria para crear un láser eficiente.

La extraordinaria intensidad y coherencia de la radiación de láser produjeron una revolución en muchos sectores de la técnica. En el último decenio la producción de los láseres se convirtió en una importantísima rama de la industria. Los láseres encuentran aplicación como generadores de radiación que transmiten no sólo energía, sino también información. Se lleva a cabo una intensiva investigación de la posibilidad de hacer uso de los láseres para realizar la reacción termonuclear. Se introdujo en la práctica el empleo del láser como escalpelo, como instrumento para efectuar las más finas operaciones quirúrgicas y como medio para separar los isótopos. En el curso de la ulterior exposición hablaremos de algunas aplicaciones de los láseres.

Luminiscencia

La radiación térmica es una propiedad universal de todos los cuerpos. El cuerpo emite rayos térmicos a cualquier temperatura comenzando por cero absoluto. El espectro térmico es continuo y se representa por medio de una curva cuyo carácter ya hemos considerado. Es cierto que se ha tomado la curva para el cuerpo negro, pero, de principio, la curva para los cuerpos coloreados se distingue en pocos aspectos de la para los cuerpos negros. La diferencia consiste tan sólo en que para los cuerpos coloreados la curva será deformada. Pero el incremento general de la energía de radiación a medida que crece la temperatura, así como el desplazamiento del máximo al lado izquierdo (si por el eje de abscisas vienen marca-

das las longitudes de las ondas) son una ley general.

Cualquier radiación consiste en la transición del nivel de energía más alto al más bajo. Pero las causas de excitación de los átomos o moléculas pueden ser diversas. En el caso de radiación térmica éstas son los impactos obtenidos por las partículas de la sustancia debido al movimiento térmico.

Sin embargo, ésta no es la única causa que obliga al cuerpo a emitir ondas. El fenómeno de luminiscencia cuya descripción abordamos tiene otra naturaleza. Este fenómeno se hace extender a los procesos de excitación de las moléculas no relacionados con el aumento de la temperatura del cuerpo. Pueden servir de causa de excitación de las partículas los encuentros con los haces de fotones o electrones, impactos mecánicos, el rozamiento, etc.

Prácticamente, todas las sustancias producen luminiscencia. Sin embargo, solamente algunas entre éstas —los luminóforos— acusan un brillo intenso y tienen valor práctico.

Los luminóforos se utilizan como materiales con los cuales se recubren las pantallas de los televisores y osciló grafos. En este caso la luminiscencia se produce bajo los impactos de los electrones. Resulta muy vistosa la luminiscencia de las sustancias originada por la acción de la radiación ultravioleta. En todo caso, la energía del fotón incidente debe ser mayor que la del fotón emitido. De este modo, el cuanto de energía incidente puede pertenecer a la parte invisible del espectro, mientras que el emitido, a la visible.

Si una sustancia se somete a la radiación ultravioleta, las milmillonésimas partes de impurezas de la sustancia luminiscente revelarán su presencia. Por esta razón, el análisis luminiscente se utiliza, a veces, como uno de los procedimientos del análisis químico. Valiéndose de aquél se determinan las trazas de impurezas indeseables.

Con luminóforos se recubren las paredes de las lámparas de luz diurna.

Se diferencian dos tipos de luminiscencia: la fluorescencia y la fosforescencia. La fluorescencia es la luminiscencia del átomo o de la molécula que se produce sin la retención de la molécula en el nivel excitado. Por el contrario, la fosforescencia es un fenómeno que puede producirse con un retardo grande. Este hecho tiene lugar si para la excitación el sistema pasa al nivel metaestable siendo poco probables las transiciones desde este nivel hacia abajo. Por regla general, la radiación tiene lugar después de que la molécula, primero, absorberá la energía y subirá al nivel superior y luego ya tendrá lugar la luminiscencia, con la particularidad de que la transición al nivel inferior se realiza sin retenerse en el nivel intermedio, metaestable.

Cabe decir varias palabras acerca de la electroluminiscencia que se produce en algunos diodos semiconductores en la frontera de la capa p—n. Este interesante fenómeno tiene enorme importancia práctica por cuanto con su ayuda pueden crearse láseres a semiconductores. La base de este fenómeno consiste en lo siguiente: el electrón y el hueco del semiconductor pueden recombinarse con la radiación del fotón.

Para conseguir que semejantes transiciones se efectúen ininterrumpidamente es necesario dejar pasar a través del diodo la corriente eléctrica. La tarea estriba en saber encontrar el material conveniente que satisfaga varios requisitos. En primer lugar, la corriente, si se puede decir así, debe inyectar los electrones en el semiconductor del tipo p, o sea, en el semiconductor que contiene más huecos, o bien, debe bombear los huecos en el cristal del tipo n. Lo expuesto es una condición indispensable. Pero otros factores, como, por ejemplo, la velocidad de transición del nivel superior al inferior, pueden jugar un papel decisivo. Se dan casos en que todos los factores favorecen la transición de los electrones

desde arriba abajo y aparece la electroluminiscencia.

El más apropiado para crear la electroluminiscencia resultó ser el semiconductor arseniuro de galio. Este proporciona una cantidad suficiente de fotones. Los fotones se propagan a lo largo de la frontera p—n. Dos sectores del diodo perpendiculares a la frontera se pulimentan debido a lo cual se produce la cavidad resonante. Los fotones que se forman durante la recombinación del hueco y del electrón resultan cofásicos y para las corrientes lo suficientemente grandes la radiación se hace análoga a la de los láseres descritos antes, con todas las consecuencias que de aquí derivan respecto al carácter filiforme, la directividad y la polarización de la radiación.

Los láseres a semiconductores trabajan en el diapasón de ondas desde ultravioleta hasta la luz infrarroja lejana y se utilizan ampliamente para los más diversos fines.

Capítulo 2
Instrumentos ópticos

El prisma

El arsenal de instrumentos que se emplean en los laboratorios y en la industria varía con tanta rapidez que el investigador que debido a una u otra causa abandonó por un par de decenios su labor científica y después la reanudó se vería obligado a estudiar de nuevo. Sin embargo, tanto hoy, como, probablemente, en un futuro lejano, siempre se encontrará con sus viejos conocidos: el prisma y la lente. A raíz de ello, vamos a recordar al lector las sencillas leyes a que se subordina el curso del rayo luminoso al encontrarse con estos objetos preparados de materiales transparentes. Desde luego, la transparencia es un concepto relativo. Para algunas ondas electromagnéticas resultan transparentes la madera y el hormigón.

Las leyes del encuentro del rayo con los cuerpos capaces de reflejar y refractar este rayo son simples hasta el momento en que hace su aparición el aspecto ondulatorio de la luz. Dichas leyes se reducen a la ley de la reflexión (el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión) y a la de la refracción.

Como se conoce, al incidir en la frontera entre dos medios el rayo de luz se desvía de la dirección inicial. El ángulo de incidencia i y el ángulo de reflexión r están ligados por medio de la relación

$$n = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r}.$$

Esta ley fue establecida mediante meticulosas mediciones por el físico Willebrord Snellius (1580—1626), profesor de la Universidad de Leyden. El contenido del curso de sus conferencias en que se exponían los fenómenos del encuentro de la luz con los cuerpos transparentes fue bien conocido en el entonces estrecho círculo de hombres de ciencia europeos.

Es posible que precisamente debido a esta causa los contemporáneos admitieran burlonamente el libro de Renato Descartes (1596—1650) publicado en 1637 con el título de «Discurso del método para conducir bien la razón y buscar la verdad en las ciencias», en que, supuestamente, «demostró» esta ley recurriendo a razonamientos que para nosotros suenan bastante extraños. Las frases confusas de Descartes no provocaron, ni mucho menos, el temblor de entusiasmo en sus colegas. Y la circunstancia de que, a resultas de sus razonamientos, Descartes llegó a la fórmula correcta, la explicaron de una manera muy sencilla: porque ajustó sus razonamientos al resultado ya conocido con anterioridad. De este modo, Descartes tuvo que soportar también que le acusaran de plagio.

Tal vez, se pueda coincidir con los contemporáneos de Descartes en su actitud escéptica respecto a este libro. Descartes examina una pelota arrojada contra una red floja. La pelota rompe la red y pierde la mitad de su velocidad. Entonces —escribe el gran filósofo—, el movimiento de la pelota se diferencia por completo del de su destinación en uno u otro sentido. Es difícil comprender qué significa esto. Probablemente, empleando esta frase Descartes hubiera querido decir que la componente horizontal de la velocidad de movimiento de la pelota no varía y la vertical sí varía, por cuanto precisamente en esta dirección la red impide el movimiento de la pelota.

Pero, retornemos a la ley de la refracción.

Los ángulos i y r suelen marcarse respecto a la posición de la normal de tal forma como se representa en la

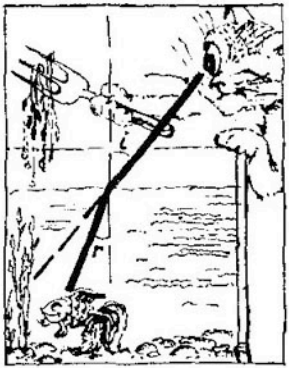


Fig. 2.1.

fig. 2.1. La magnitud n llamada índice de refracción depende de los medios de los cuales se trata. Con el fin de comparar los cuerpos por sus propiedades ópticas es conveniente componer la tabla de índices de refracción para el caso de incidencia del rayo proveniente del aire (si se quiere ser puntual, hay que decir: proveniente del vacío) en el medio. En este caso el ángulo de refracción siempre será menor que el ángulo de incidencia y, por consiguiente, el índice de refracción será menor que la unidad.

Hablando con propiedad, el índice de refracción se acrecienta con la densidad del medio. Por ejemplo, el índice de refracción del diamante es igual a 2,4, y el del hielo es igual a 1,3.

No prestaré lugar a la tabla de índices de refracción. Sin embargo, de haberlo hecho tendría que señalar para qué longitud de onda de la luz se insertan los datos. El índice de refracción depende de la longitud de onda. Este importante fenómeno que sirve de base para el funciona-

miento de una serie de instrumentos que descomponen la radiación electromagnética en espectro lleva el nombre de dispersión.

Si la luz incide de un medio menos denso en otro más denso, puede tener lugar la reflexión interna total. En este caso el índice de refracción es menor que la unidad. A medida que crece el ángulo de incidencia el ángulo de refracción se aproximará cada vez más a 90°. Para la condición

$$\text{sen } r = 1, \quad \text{sen } i = n$$

la luz dejará de pasar al segundo medio reflejándose totalmente de la superficie de separación. Para el agua el ángulo de la reflexión interna total equivale a 49°.

La refracción de la luz mediante una lámina plana puede aprovecharse para «desplazar» el rayo, dejándolo paralelo a sí mismo. Y con ayuda de un prisma el rayo de luz puede hacerse girar.

Si el lector quiere recordar la deducción de la fórmula para el ángulo de giro D del rayo la hallará en el manual escolar. La deducción requiere únicamente conocimiento de geometría elemental, sin embargo, es muy engorrosa, en particular, si se lleva a cabo para un prisma grueso y el valor arbitrario del ángulo que el rayo, al incidir, forma con el prisma. Una fórmula simple resulta en el caso de que el prisma es delgado y el ángulo de incidencia del rayo en la cara del prisma no difiere mucho del recto. Siendo así, tenemos

$$D = (n - 1)\, p,$$

donde p es el ángulo entre las caras del prisma.

Haciendo uso de un prisma, el gran Newton, a finales del siglo XVII, demostró por primera vez que la luz blanca no es monocromática, sino se compone de rayos de distintos colores. Los que más se desvían son los rayos violeta, y los que menos, los rojos. Precisamente por esta razón decimos rayos «ultravioleta» y rayos «infrarrojas» y no infravioleta y ultrarrojas.

El mundo científico se enteró del descubrimiento de Newton en 1672. En la descripción de sus experimentos Newton es explícito y preciso. Aquí se revela su genial intelecto. Pero en lo que se refiere a la presentación verbal, su comprensión representa una ardua labor. Tan sólo desbrozando a duras penas el camino a través de la fragosidad de las palabras, se logra hacer constar: aunque el autor prometió exponer los hechos sin crear hipótesis (el famoso «hipotesis non fingo» newtoniano), no iba a cumplir su promesa. Muchos de sus axiomas y definiciones, a semejanza de: «el rayo de luz es su parte ínfima» suenan excepcionalmente extrañas para el oído moderno.

Hasta el momento, en la química hace su servicio el espectrógrafo cuya parte fundamental es el prisma newtoniano. El material debe poseer gran dispersión. Los prismas para el espectrógrafo se preparan de cuarzo, de fluorita y de sal gema. La luz a investigar se deja pasar a través de una rendija dispuesta en el plano focal principal de la lente de entrada. A resultas de ello sobre el prisma incide un haz paralelo de luz. Los fotones de frecuencia diferente irán en distintas direcciones. La segunda lente, la de salida, acumulará fotones iguales en un punto del plano focal. Si se quiere, el espectro puede verse con el ojo. Con este fin, hay que colocar un vidrio mate. El espectro puede fotografiarse.

En el momento actual, el espectro se registra mediante autorregistradores. A lo largo del espectro se desliza el receptor de energía que es una célula fotoeléctrica o un termoelemento que produce corriente cuya intensidad es proporcional a la intensidad de la luz. Esta corriente hace desviarse la parte móvil del dispositivo registrador de la misma manera, exactamente, como la corriente del galvanómetro desvía su aguja. A la parte desviada se ajusta una pluma; ésta graba el espectro en un rollo de papel que se desenvuelve a velocidad constante.

La lente

Existe una gran rama de la industria fabricadora de lentes. Cuerpos transparentes limitados por dos superficies esféricas o por una esférica y otra plana los hay de los más diversos tamaños. En algunos instrumentos se utilizan lentes cuyo tamaño es como el de una pequeña moneda metálica, y en los grandes telescopios el diámetro de la lente puede ser igual a varios metros. La fabricación de las lentes de grandes dimensiones es un gran arte, ya que una buena lente debe ser homogénea.

Por supuesto, cada uno de nuestros lectores tenía en las manos una lente y está enterado de sus principales particularidades. La lente aumenta el objeto, la lente enfoca los rayos. Valiéndose de una lente que intercepta el camino del rayo del sol es fácil encender un trocito de papel. La lente «concentra» los rayos en un punto. Este es el foco de la lente.

El hecho de que los rayos paralelos convergen en un punto y, por el contrario, el que la lente crea un haz paralelo de rayos, si en el foco de la lente se sitúa la fuente puntual de luz, se demuestra mediante la ley de la refracción y a base de razonamientos geométricos sencillos.

Si un punto no se encuentra en el foco, sino a la distancia a del centro de la lente, entonces, los rayos que parten de éste se acumularán a una distancia a'. Estas dos distancias están relacionadas por medio de la fórmula conocida:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f};$$

aquí f es la distancia focal de la lente.

No es difícil demostrar que los rayos de luz que parten del objeto situado más lejos que la doble distancia focal crearán su imagen invertida y disminuida en razón de a'/a entre el foco y la distancia focal doble.

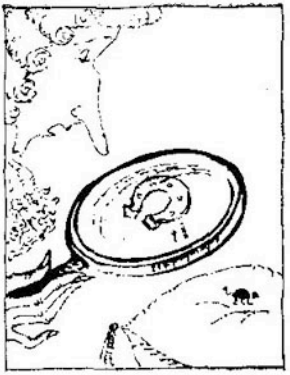


Fig. 2.2.

Si el objeto se traslada a la posición que ha ocupado la imagen, ésta se trasladará a la posición que ha ocupado el objeto. Actúa el llamado principio de reversibilidad del curso de los rayos.

Cuando utilizamos la lente como lupa, el objeto se encuentra entre la lente y su foco. En este caso, la imagen no se invierte y halla por el mismo lado que el objeto (fig. 2.2).

Voy a recordar la diferencia que existe entre el caso de la lupa y los dos ejemplos anteriores: la lupa crea una imagen «virtual», mientras que para otras disposiciones del objeto obtenemos imágenes que se pueden ver en la pantalla o fotografiar. Con plena razón las llamamos reales.

El aumento que da una lupa es tanto mayor cuanto menor es su distancia focal. Las posibilidades límites de la lupa son bastante modestas: lo máximo que se consigue es hacer el ángulo visual bajo el cual se ve la imagen virtual de 20 a 30 veces mayor que el ángulo

visual bajo el cual observamos el objeto a simple vista.

Muchos instrumentos ópticos serían extremadamente simples componiéndose de lentes unitarias si no fuese por una serie de defectos inevitables. Nosotros queremos que la lente concentre el haz paralelo de la luz blanca en un solo punto. Pero el fenómeno de dispersión lo impide. La causa reside en que los fotones de diferente color se desviarán por la lente en direcciones distintas. Como resultado, en vez de un punto obtendremos una línea coloreada extendida a lo largo del eje de la lente. Es la aberración cromática.

Otro infortunio es la aberración esférica. Los rayos que pasan más cerca del eje de la lente se enfocarán en un punto más alejado que aquellos cuya ruta resulta más apartada del eje.

Es distinto el comportamiento de los rayos que inciden en la superficie de la lente formando ángulos grandes o pequeños. En lugar de un punto obtenemos un núcleo luminoso desplazado a un lado de la posición correcta. Del núcleo parte una cola. Este efecto se denomina coma. La palabra «coma» traducida del griego significa en una de sus acepciones «cabellera suelta».

Lo expuesto anteriormente está muy lejos de agotar la lista de las distorsiones que ocasiona la lente unitaria. Si examinamos un cuadrado veremos un cuadrilátero cuyos vértices vienen unidos por arcos «humidos» por dentro. Dicho fenómeno ocurre debido a que los rayos que parten de los vértices del cuadrado y de los centros de sus lados se refractarán de diferente manera.

Grandes contratiempos depara a los diseñadores de los instrumentos ópticos el defecto que lleva el nombre de astigmatismo. Si el punto se encuentra lejos del eje óptico principal de la lente, su imagen se desdoblará en dos franjas perpendiculares entre sí y desplazadas hacia los lados opuestos con respecto a la posición de la imagen ideal.

Hay también otras distorsiones. Los especialistas en el campo de producción de las lentes suelen reducir todas las variedades de las distorsiones a siete tipos principales. Hemos mencionado entre éstos tan sólo cinco.

Como suele suceder muy a menudo en la técnica, al crear una buena lente tenemos que aceptar un compromiso. Queda absolutamente claro que junto con el tamaño de la lente incrementarán las distorsiones, mas, por otra parte, la iluminación de la imagen (o sea, el número de fotones de la luz visible correspondientes a una unidad de superficie) es proporcional al cuadrado del diámetro de la lente (es decir, a su área). Pero queda algo más. Supongamos que el objeto cuya imagen da la lente se encuentra lejos. Entonces, la imagen se concentrará en el foco. Cuanto menor sea la distancia focal, tanto menor será el tamaño de la imagen. En otras palabras, el flujo luminoso que parte del objeto se concentrará en un área menor. Esto significa que la iluminación será inversamente proporcional a la distancia focal.

Debido a estas dos causas, se denomina luminosidad de una lente el cuadrado de la relación de su diámetro a la distancia focal.

La menor distancia focal la poseen lentes gruesas, o sea, lentes cuyas superficies están formadas por radios pequeños. Pero precisamente estas lentes darán mayores distorsiones. En consecuencia, el aumento de la luminosidad de la lente, ya sea a costa de sus dimensiones, o bien, a costa del radio de curvatura, conduce a la mala calidad de la imagen. Los técnicos se ven obligados a resolver un problema nada fácil.

La cámara fotográfica

La cámara fotográfica más simple no es sino una lente que hace las veces de ventanillo en una caja oscura. La imagen creada por la lente se fija en la placa fotográfica dispuesta enfrente del ventanillo.

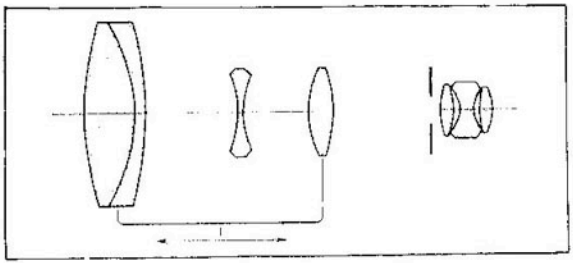


Fig. 2.3.

Sin embargo, una lente simple da una imagen deformada. A raíz de ello, se sustituye por un sistema complejo de lentes que debe contrarrestar los infortunios ópticos de toda índole. Dicho sistema lleva el nombre de objetivo.

¿De qué manera se pueden eliminar las distorsiones? Hace tiempo que se ha propuesto utilizar un sistema de lentes seleccionadas de tal forma que los defectos de cada una de éstas se compensen por los defectos de otras. Este principio de obtención de un efecto positivo por multiplicación de dos efectos negativos resulta posible realizar para la eliminación de todos los siete defectos valiéndose tan sólo de tres lentes. Sin embargo, así resulta sólo de principio. En la realidad, para crear una imagen más perfecta se utilizan combinaciones más complicadas. Una de éstas (no la más compleja, ni mucho menos) se representa en la fig. 2.3. Este sistema de lentes convexas y cóncavas es capaz de proporcionar una imagen no deformada simultáneamente con una variación considerable del grado de aumento. La primera y la tercera componentes del sistema se desplazan una respecto a otra con lo cual se consigue la variación continua de la distancia focal en tres veces.

La cámara fotográfica necesita un simple dispositivo que permite «orientar el aparato al foco». Con este fin hay que tener la posibilidad de cambiar la distancia entre el centro del objetivo y la película fotográfica. Hasta el día de hoy se han conservado aparatos fotográficos cuya cámara se fabrica plegable, en forma de fuelle, y que se puede contraer. Y cabe decir que semejantes aparatos permiten sacar fotos nada malas.

En un aparato fotográfico moderno que cabe en la palma de la mano esta operación se realiza de una forma más elegante, con un movimiento helicoidal de la montura del objetivo. Como resulta claro del análisis referente a la luminosidad de la lente, la calidad de la imagen mejora si reducimos máximamente posible la «pupila» de la cámara. Esto se consigue con la ayuda de un diafragma de diámetro variable. Las dimensiones del diafragma se eligen de modo que sean menores, pero que dejen pasar una cantidad suficiente de luz, con la finalidad de dar una buena imagen durante la exposición prefijada.

¿Por qué parecen tan graciosas las fotografías tomadas en los tiempos en que la técnica fotográfica se encontraba todavía en pañales? Salta a la vista que las personas en la foto quedaron inmóviles en postura tiesa. La explicación resulta muy simple: el fotógrafo se veía obligado a recurrir a exposiciones prolongadas. Precisamente por esta razón tenía que proferir las palabras sacramentales: «Tranquilo, saco la foto».

La lucha por obtener una buena imagen con exposición mínima se libra por dos vías. La primera es el perfeccionamiento del objetivo. Y esto se lleva a cabo no sólo a costa de selección de la geometría de las lentes que constituyen el objetivo. En un objetivo compuesto por varias lentes casi la mitad de la luz se refleja, lo que conduce, primero, a las pérdidas en la iluminación de la imagen y, segundo, crea un fondo luminoso que disminuye el contraste de la imagen. Contra este fenómeno se

lucha por medio del procedimiento que lleva el nombre de tratamiento antirreflejo de la óptica. A la superficie de las lentes se aplican películas finísimas. Debido al fenómeno de interferencia la parte de la luz reflejada disminuye de una manera brusca. Es fácil distinguir los objetivos con la óptica «tratada»: su cristal tiene matiz azulado.

La segunda vía para mejorar las fotografías es el perfeccionamiento de la película fotográfica.

Conviene decir varias palabras acerca del proceso fotoquímico que conduce a la formación de la imagen. La capa fotosensible es gelatina en la que están introducidos cristales de bromuro de plata con pequeña impureza de yoduro de plata. El tamaño de los granos cristalinos varía entre los límites desde una milésima hasta una diezmilésima de milímetro. El número de granos correspondientes a 1 cm^2 de película se encuentra dentro del margen de decenas a centenares de miles. Si la capa de la emulsión fotográfica se observa bajo el microscopio se puede ver que los granos se disponen bastante densamente.

Los fotones que caen sobre el grano de la emulsión destruyen los enlaces entre los átomos de plata y los de halógeno. El número de átomos de plata que obtuvieron libertad es estrictamente proporcional al de fotones caídos en la película. El fotógrafo elige una exposición en que se destruye gran cantidad de enlaces entre los átomos de plata y de bromo. No obstante, al mismo tiempo la exposición no debe ser demasiado larga. Una exposición prolongada llevará a que los enlaces entre los átomos de plata y de bromo se destruyan totalmente. Entonces, después del revelado los cristales desprenderán toda la plata contenida en éstos y la placa resultará igualmente negra en todos los puntos.

Durante una exposición correcta en la placa fotográfica se crea la imagen latente del objeto. En cada grano, el número de enlaces destruidos es proporcional al nú-

mero de fotones incidentes en este grano. El proceso de revelado consiste en dar la posibilidad de reunirse a los átomos de plata potencialmente libres. En este caso, la cantidad de plata desprendida en el negativo después de revelar la película será proporcional a la intensidad de la luz.

De lo expuesto queda claro que los pequeñísimos detalles que representa la fotografía del objeto no pueden ser, de ningún modo, mayores que el tamaño del grano cristalino de bromuro de plata.

Una vez revelada la placa debe fijarse. Este proceso consiste en eliminar el bromuro de plata no descompuesto. Si estos granos no descompuestos no se eliminan, entonces, al sacar el negativo a la luz, lo «velaremos», pues en este caso los granos desprenderán por completo toda la plata que contienen.

La física de obtención de la imagen positiva es tan evidente que no nos daremos trabajo de parar en ésta.

La técnica de fotografía en color moderna dista mucho de ser simple y merece gran admiración. En cuanto a la física de este proceso, ésta no tiene nada de complicado. El modelo de percepción de la luz ofrecido ya a mediados del siglo XVIII es absolutamente correcto. El ojo del hombre posee receptores de tres colores: rojo, verde y azul. Al combinar estos colores en distintas proporciones es posible crear la sensación de cualquier color. En correspondencia con lo expuesto, para obtener una imagen en color hay que disponer de una película de tres capas. La capa superior debe ser sensible a los rayos azules; la central, a los verdes, y la inferior, a los rojos. No hablaremos de cómo los químicos alcanzan semejante estado de cosas. El negativo en color se transforma en positivo en color, utilizando también el papel fotográfico de tres capas.

El ojo

El ojo creado por la naturaleza es un maravilloso instrumento físico. La posibilidad de distinguir decenas de miles de matices de los colores, de ver a distancias cortas y largas, de percibir con los dos ojos las relaciones volumétricas del objeto, así como la sensibilidad frente a las intensidades luminosas muy insignificantes, todas éstas son propiedades que podrán hacer honor al instrumento de la más alta clase. Es cierto que el ojo del hombre ve solamente una pequeña porción del espectro. Los ojos de una serie de animales carecen en cierto grado de esa imperfección.

La estructura del ojo recuerda la de un aparato fotográfico. El papel del objetivo lo desempeña el cristalino que tiene la forma de una lente biconvexa. El cristalino es blando y es capaz de cambiar su forma por acción de los músculos que lo abarcan. En esto consiste el proceso de acomodación del ojo que permite igualmente bien ver tanto los objetos próximos, como los alejados. Con la edad el cristalino se torna más duro y los músculos se aflojan, y en relación con ello el hombre necesita gafas «para la lejanía» y «para la lectura».

La imagen del objeto se proyecta a la pared posterior del ojo. El nervio óptico transmite esta sensación al cerebro.

El ojo normal de una persona joven es capaz de examinar con detalle el objeto situado a una distancia no menor de 10 cm. A medida que avanza la edad, suele desarrollarse la presbicia y esta distancia crece hasta 30 cm.

Delante del cristalino se encuentra la pupila que hace las veces del diafragma del aparato fotográfico. La abertura de la pupila puede variar dentro de los límites de 1,8 a 10 mm.

El papel de la placa fotográfica en que se forma la imagen lo desempeña la retina cuya estructura es muy

compleja. Bajo la retina se sitúa el epitelio del ojo que consta de células sensibles a la luz que se denominan conos y bastoncillos. El lector puede comparar el número de estas células con el de granos de bromuro de plata en la placa fotográfica. El número de células visuales supera cien millones. Por cuanto el hombre es capaz de distinguir colores, está claro que las células visuales poseen sensibilidad disímil respecto a las diferentes zonas del espectro. Llegaremos al mismo resultado al suponer que las células se dividen en clases sensibles a distintas zonas del espectro.

Si la vista resulta normal, entonces, el foco posterior del ojo en estado tranquilo se encuentra en la retina. Si el foco se halla delante de la retina, la persona es miope, y si detrás de la retina, la persona padece presbicia. Lo que conduce a estos dos defectos difundidos es el grueso demasiado grande o demasiado pequeño del cristalino. Hay personas que padecen astigmatismo. En este caso, el cristalino en estado normal no tiene forma regular de un cuerpo limitado por dos superficies esféricas.

Todos estos defectos se corrigen con la ayuda de las gafas las cuales, junto con el cristalino, deben formar un sistema óptico que enfoque la imagen del objeto en la retina.

Las lentes de las gafas se caracterizan por el número de dioptrías. La dioptría es la unidad del poder óptico (vergencia) de una lente y esta magnitud es inversamente proporcional a la distancia focal. El poder óptico en dioptrías es igual a la unidad dividida en la distancia focal en metros. Las distancias focales de las lentes divergentes que utilizan en sus gafas las personas présbitas son negativas.

El ángulo visual del ojo es mucho mayor que nos parece. Una serie de acontecimientos que suceden bajo el ángulo de 90° a cada lado respecto a la mirada directa se fija inmediatamente en la subconsciencia. Esta circunstancia, con frecuencia, suscita en las personas la

errónea opinión de que «sienten» la mirada de un transeúnte sin verlo. El ojo discierne mal los objetos vistos bajo un ángulo menor que un minuto de arco. Esto tiene lugar hasta con una buena iluminación.

El polarizador

La onda luminosa es una onda electromagnética. Como se ha señalado en el libro 3, por medio de experimentos patentes puede demostrarse que el vector del campo eléctrico es perpendicular a la dirección del rayo. Si este mismo hecho se interpreta considerando la luz en el aspecto corpuscular es conveniente indicar que la partícula de luz —el fotón— no es una bolita, sino una flechilla. En una serie de cálculos complicados los físicos teóricos llegaban a la conclusión de que el fotón posee espín (igual a 1). De este modo es bastante natural representar el fotón como flechilla.

Un rayo de luz ordinario no es sino un flujo de fotones cuyos espines están dispuestos de manera desordenada. Dicho rayo luminoso se denomina no polarizado. Sin embargo, en una serie de casos tenemos que tratar con el haz de fotones la totalidad de cuyos espines miran en el mismo sentido, o, empleando otro lenguaje, tenemos que ver con ondas electromagnéticas cuyo vector eléctrico posee una dirección completamente determinada. Tales rayos se denominan polarizados.

Uno de los procedimientos para la obtención de los rayos polarizados consiste en hacer pasar el rayo luminoso a través de un cristal de baja simetría. Estos cristales orientados de una forma adecuada respecto al rayo incidente acusan la capacidad de desdoblar el rayo natural en dos rayos polarizados en dos direcciones mutuamente perpendiculares.

Lamentablemente, no estoy en condiciones de dar al lector ni siquiera una noción mínima de por qué ocurre así. Este hecho está relacionado con que las moléculas

del cristal «reciben» de diferente manera las ondas con los vectores eléctricos dispuestos de una forma desigual. Pero temo que no se sienta aliviado por esta frase. Sólo me permito asegurar que la teoría del desdoblamiento de los rayos sí que existe y que, además, es una teoría excelente que describe todos los detalles de este interesante fenómeno. En particular, se puede predecir cómo variará el cuadro del paso de la luz si colocamos el cristal bajo distintos ángulos respecto al rayo luminoso.

Al desdoblar el rayo no polarizado en dos polarizados, podemos, seguidamente, sin especial dificultad, llegar a tal estado de cosas en que uno de estos rayos se desvíe por algún lado. Una vez conseguida esta finalidad obtenemos el instrumento llamado nicol, en honor de su creador, el físico inglés William Nicol (1768—1851). Inventó el instrumento todavía en 1820. Es interesante señalar que todas las explicaciones referentes a la polarización de la luz se daban en aquella época en el lenguaje corpuscular considerándose una confirmación magnífica de la teoría corpuscular de la luz de Newton.

Al poco tiempo se descubrieron los fenómenos de interferencia y de difracción cuya explicación mediante el lenguaje ondulatorio era tan natural que la teoría de los corpúsculos luminosos resultó sepultada. Sin embargo, transcurrió un siglo y la teoría resucitó —como la fabulosa ave Fénix renace de sus cenizas— aunque en forma mucho más modesta de uno de los dos aspectos del campo electromagnético.

Si el camino de la luz lo intercepta un polarizador, la intensidad del rayo disminuirá, como conviene esperar, al doble. Pero el fenómeno más interesante, el cual demuestra, precisamente, la existencia de la polarización, tendrá lugar cuando coloquemos en el camino del rayo un segundo instrumento, análogo al primero. Este se denomina analizador a pesar de que no se diferencia en nada del primer nicol. Hagamos ahora girar el nicol en torno al rayo de luz. Resultará que la intensidad de la

luz que pasó a través de dos nicoles para cierta posición recíproca de éstos es la misma que en ausencia de nicoles. Decimos: en esta posición los nicoles son paralelos. Ahora hagamos girar el analizador. Cuando le demos vuelta de 90° la luz deja pasar. En este caso se dice que los nicoles están cruzados.

En la posición intermedia, cuando el segundo nicol esté desviado de la posición paralela en un ángulo α, la intensidad será igual a $^1/_2 I \cos^2 \alpha$. La fórmula se explica con facilidad si se admite que el vector del campo eléctrico está descompuesto en dos componentes: una perpendicular y otra paralela a la «rendija» del analizador. Y la intensidad, como sabemos, es proporcional al cuadrado de amplitud de la onda, es decir, al cuadrado del vector eléctrico. Por lo tanto la variación de la intensidad de la luz debe efectuarse de acuerdo con la ley del cuadrado del coseno.

El análisis de la luz polarizada tiene varias aplicaciones prácticas. Imaginémonos que los nicoles están cruzados y entre éstos está colocado un cuerpo transparente capaz de hacer girar el vector eléctrico de la onda. En este caso tendrá lugar la aclaración del campo observado. Dicha capacidad la poseen los cuerpos que se encuentran bajo tensión. Según sea el valor de la tensión, el giro del vector luminoso y, junto con éste, también la aclaración del campo detrás de los nicoles cruzados serán diferentes. Veremos cuadros hermosos (y, además, coloreados por cuanto los fotones de distintos colores se comportan de diferente manera) que permiten juzgar sobre las tensiones en la muestra, o bien, si están orientadas o no las moléculas de la misma. Son datos valiosos y, a raíz de ello, un buen microscopio está dotado de dos nicoles para que haya posibilidad de examinar la imagen del objeto en la luz polarizada. La información acerca de la estructura será más rica.

También las soluciones de muchas sustancias son susceptibles de hacer girar el vector eléctrico de la onda luminosa, por ejemplo, las soluciones de azúcar. En este

caso, el ángulo de giro resulta estrictamente proporcional a la cantidad de azúcar en la solución. Por lo tanto, es posible acomodar el polarímetro para medir el contenido de azúcar. Estos instrumentos se denominan sacarímetros y se pueden encontrar casi en cualquier laboratorio químico.

Estos dos ejemplos no agotan las aplicaciones de los polarímetros, pero las dos expuestas son, probablemente, las principales.

El microscopio y el telescopio

La parte óptica del microscopio consta del ocular y el objetivo. El ocular es una lente a la que arrimamos el ojo, y el objetivo casi toca el objeto examinado. El objeto se coloca a una distancia que supera algo la distancia focal del objetivo. Entre el objetivo y el ocular aparece la imagen inversa aumentada. Es necesario que ésta se encuentre entre el ocular y el foco del ocular. El ocular desempeña el papel de lupa. Se puede demostrar que el aumento del microscopio es igual al producto de los aumentos proporcionados por el ocular y el objetivo tomados por separado.

A primera vista puede parecer que valiéndose del microscopio es posible observar detalladamente todos los elementos tan pequeños como se quiera del objeto. ¿Por qué, por ejemplo, no hacer una foto que aumente el tamaño miles de veces para, luego, observarla detalladamente bajo el microscopio, obteniendo ya un aumento de millón de veces, y así sucesivamente.

Un razonamiento de esta índole no resiste la crítica. Ante todo, cabe recordar que el aumento de los cuadros fotográficos está limitado por el tamaño del grano de la película fotográfica. Es que cada pequeño cristal de bromuro de plata actúa como un todo único. El lector, sin duda, habrá visto fotografías muy aumentadas, advirtiendo que el aumento no conduce, ni mucho menos, a la

precisión del cuadro, sino, por el contrario, hace más borrosos los detalles.

Ahora bien, si podemos evitar la operación de fotografiar aumentando la imagen por métodos ópticos —lo que es completamente posible pues no hay nada que impida elevar el número de lentes— nos convenceremos pronto que también en este caso el gran aumento no tiene sentido. El aspecto ondulatorio del campo electromagnético pone límite al aumento útil de cualquier instrumento. Ya sea que observamos el objeto a través de un diminuto cristal de aumento, ya sea que a simple vista, o bien, con la ayuda de un microscopio o telescopio, en todos estos casos, sea como sea, la onda luminosa procedente del punto luminoso debe pasar a través de un orificio. Pero en estas circunstancias aparece el fenómeno de difracción, es decir, la desviación del rayo luminoso del camino recto. En uno u otro grado el rayo «dobla la esquina». Debido a ello, la imagen del punto nunca será un punto, sino una mancha. Y por mucho que se esfuerce es imposible hacer el tamaño de esta mancha menor que la longitud de onda de la luz.

Es de esencial importancia el saber determinar aproximadamente en qué condiciones la marcha de la onda electromagnética se desvía considerablemente del camino rectilíneo.

Si designamos por x la desviación lineal desde el camino recto observada a la distancia l del manantial de la radiación, siendo igual a a el tamaño del obstáculo o del orificio que se encuentra en la trayectoria seguida por el rayo, entonces, tiene lugar la siguiente relación:

$$x = \lambda l/a.$$

Aquí λ es la longitud de onda. De esta ecuación se deduce que la difracción puede observarse tanto debido a partículas pequeñísimas, como a cuerpos celestes. Todo depende de qué longitudes de onda y de qué distancias se trata. Lo mismo se puede decir sobre los orificios. Para observar

la difracción no es obligatorio, en modo alguno, tener que ver con orificios minúsculos. Por ejemplo, un orificio capaz de dejar pasar una pelota de tennis también permite observar los fenómenos de difracción aunque a las distancias del orden de cientos de metros.

La elemental ecuación que hemos presentado permite juzgar sobre las máximas posibilidades de los microscopios y telescopios.

El microscopio no nos da la posibilidad de discernir detalles del objeto con mayor precisión que un micrómetro. Y en cuanto a los detalles con dimensiones milimétricas los vemos a simple vista. De aquí resulta claro que al utilizar el microscopio óptico no tiene sentido afanarse para conseguir que el aumento sea mayor que en mil veces.

Esta restricción atañe al microscopio óptico. Ahora bien, si se lograse diseñar un microscopio que podía trabajar no con rayos luminosos, sino con otros cualesquiera cuya longitud de onda fuese menor, entonces, incrementaría el aumento útil del microscopio. Semejante microscopio se ha creado hace tiempo y trabaja en muchos laboratorios científicos. Es el microscopio electrónico. La longitud de onda de los electrones puede elegirse muy pequeña (véase la pág. 142).

Valiéndose del microscopio electrónico se logra ver los detalles estructurales de la materia medidas en diezmillonésimas fracciones de milímetro. Los biólogos pudieron observar las moléculas de ADN, aquellas mismas moléculas con cuya ayuda los caracteres hereditarios se transfieren de los padres a sus descendientes. Se ven las moléculas de las proteínas,(es posible dilucidar la estructura de las membranas de las células, advertir los detalles de la estructura de las fibras musculares. Inserto tan sólo una fotografía récord (fig. 2.4) que muestra la red cristalina del mineral pirofilita con un aumento mayor de 3 millones. Se ve la distancia entre los planos del cristal igual a 4,45 Å.

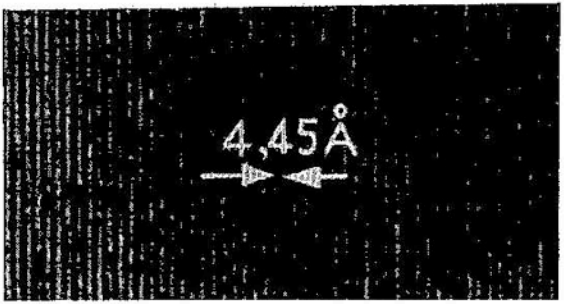


Fig. 2.4.

El límite de las posibilidades del microscopio electrónico está relacionado no con su poder resolutivo, pues podemos disminuir, sin dificultad, la longitud de onda de los electrones. El quid de la cuestión reside en el grado de contraste de la imagen: la molécula que se estudia debe colocarse en un soporte, y éste, a su vez, también consta de moléculas. Y sobre el fondo de las moléculas del soporte es difícil distinguir aquella molécula que nos interesa.

El microscopio electrónico es un instrumento complicado y caro. Su «estatura» ordinaria es del orden de un metro y medio. Los electrones se aceleran por la alta tensión. ¿Y a costa de qué se crea el aumento? El principio es el mismo que en el microscopio óptico. El aumento lo proporcionan las lentes. Pero, está claro, que estas «lentes» en nada se parecen a las de un microscopio común y corriente. Los electrones se fijan por los campos eléctricos aplicados a placas metálicas con orificios, así como por campos magnéticos engendrados por las bobinas.

Existe una gran variedad de procedimientos técnicos que ayudan a crear la imagen. Haciendo uso de micrótomos se preparan cortes finísimos que se observan al trasluz y las moléculas en el soporte se matizan sedimentando en éstas vapores de los metales. También puede obtenerse la «réplica» de la muestra, es decir, cubrirla de una película muy delgada de material transparente para luego, decapar el propio objeto.

La microscopia electrónica es un gran e importante apartado de la física y merece que se le dedique un capítulo especial. Sin embargo, el volumen reducido del presente libro me hace avanzar.

Todavía en el siglo XVI se conjeturaba que con la ayuda de vidrios convexos podían observarse los objetos lejanos. No obstante, no nos equivoquemos al atribuir el descubrimiento del telescopio (mejor dicho, del anteojo) al gran Galileo. Este instrumento fue construido en julio de 1609 y ya al cabo de un año Galileo publicó sus primeras observaciones del cielo estelar.

Al igual que el microscopio, el anteojo (el telescopio-refractor) es, de principio, la combinación de las mismas dos lentes: del objetivo vuelto al objeto y del ocular vuelto al ojo. Puesto que se observa un objeto infinitamente alejado, su imagen se crea en el plano focal del objetivo. El plano focal del ocular coincide con el plano del objetivo, y del ocular parten haces paralelos.

Las posibilidades del telescopio crecen con el aumento del diámetro del objetivo. Así, por ejemplo, para los grandes telescopios están accesibles en la Luna cráteres de 1 km de diámetro, y en los telescopios pequeños es posible distinguir, habitualmente, cráteres de 150 km de diámetro.

En un observatorio astronómico veremos no sólo telescopios-refractores. De un modo seguro, tendremos que trabar conocimiento con un telescopio-reflector. Por cuanto observamos objetos lejanos y es necesario concentrar los rayos en el foco, resulta que con este fin se puede

utilizar no una lente esférica, sino un espejo esférico. La ventaja es evidente, nos libramos de la aberración cromática. Los defectos del telescopio con espejo están relacionados tan sólo con los altos requisitos, de difícil realización, a que debe responder la superficie del espejo.

Por supuesto, también el telescopio tiene un límite de aumento útil relacionado con el aspecto ondulatorio de la luz. La luz de una lejana estrella se ensancha en un círculo lo que pone coto a la distancia angular entre las estrellas que podemos observar en el telescopio. También aquí el deseo de ampliar las posibilidades del telescopio está relacionado con el aumento de su diámetro. Probablemente, las posibilidades límites de los telescopios se encuentren en la región de una décima de segundo de arco.

En los últimos años, para secundar los telescopios, vino la nueva técnica. Los astrónomos estudian el firmamento fijando todo el espectro de las ondas electromagnéticas que nos envía el Universo. En el capítulo 7 hablaremos un poco sobre la irrupción de la física moderna en la pacífica morada de los astrónomos.

Interferómetros

Como ya hemos subrayado reiteradas veces, el campo electromagnético tiene el aspecto ondulatorio. De la misma manera, el aspecto ondulatorio lo poseen los flujos de partículas: los electrones, neutrones y protones. El sonido es el resultado de los desplazamientos mecánicos del medio que transcurren de acuerdo con la ley ondulatoria. Lo común para todos estos procesos físicos es la posibilidad de atribuir a cualquier radiación la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de propagación relacionadas por medio de la ecuación $c = \lambda\nu$. La radiación más simple es monocromática, o sea, se define por una longitud de onda. En el caso general la radiación resulta ser un espectro complejo, es decir, una suma de ondas de diferente longitud y de diferente intensidad.

El aspecto ondulatorio de la radiación se manifiesta en dos fenómenos: en la adición de las ondas que recorrieron distintos caminos, así como en el caso de la dispersión por los cuerpos que se encuentran en la trayectoria del rayo. Un caso particular importante de dispersión de ondas es la difracción. La adición de las ondas lleva el nombre de interferencia.

Aquí se tratará de la interferencia de la luz. Este fenómeno forma la base del funcionamiento de los instrumentos que ayudan a medir con precisión las distancias, así como algunas otras magnitudes físicas. Los instrumentos que se sirven del fenómeno de interferencia para fines aplicadas se denominan, precisamente, interferómetros.

El principio de medición de las distancias se reduce al cálculo del número de ondas que caben en el tramo que se mide.

A primera vista puede parecer que no es una cosa complicada realizar estas mediciones. Tomemos dos fuentes de luz y hagamos converger sus rayos en un punto. Dependiendo de cómo llegarán las ondas al punto de observación: la «cresta» con la «cresta» o la «cresta» con la «depresión», se creará una mancha clara o una mancha oscura. Planteemos ahora el problema de medir la distancia a la que queremos trasladar una de las fuentes de luz. Durante esta traslación cambiarán las relaciones fásicas de las dos ondas en el punto de observación. Lo único que nos queda es contar la cantidad de relevos de lo claro y lo oscuro, de modo que entonces, teniendo en cuenta la geometría del experimento y conociendo la longitud de onda de la luz, calcularemos sin dificultad la magnitud de la traslación.

De principio, todo es cierto. Sin embargo, al proceder de esta forma no observaremos la alternancia de lo claro y lo oscuro. La pantalla quedará todo el tiempo clara. Así, pues, el simple experimento fracasó.

Absolutamente indudable es el siguiente resultado: dos rayos de luz emitidos por diferentes fuentes y conver-

gentes en un punto siempre se intensificarán mutuamente. Entonces, ¿puede ser que la teoría ondulatoria es errónea?

No, la teoría es justa, a la radiación electromagnética le es inherente el aspecto ondulatorio. Pero, hemos procurado obrar a base de una suposición equivocada. Para que se observe la interferencia es necesario que entre las ondas que se suman se conserve siempre una diferencia de fase invariable. Mientras tanto, las relaciones de fase, incluso entre ondas que parten de dos átomos de una misma fuente, son absolutamente fortuitas. Ya hemos señalado que los átomos de luz lanzan fotones sin «ponerse de acuerdo» entre sí sobre su conducta. Por consiguiente, dos fuentes diferentes radian de una forma discorde, o, como se dice, crean una radiación no coherente.

Pero, en este caso, ¿no resulta que la radiación acorde, es decir, coherente, es algo como el Pájaro Azul? No, ¡no es así!

La solución del problema es extraordinariamente hermosa y, al mismo tiempo, sencilla al extremo, lo que es inherente a la mayoría de ideas originales: ¡hay que obligar la radiación del átomo sumarse a sí misma! Y para alcanzar este objetivo es necesario desdoblar el rayo, que parte de cada fuente, en dos fragmentos, hacer que estos dos fragmentos del rayo recorran diferentes caminos y sólo después llevarlos a un punto. Precisamente a esta condición, nosotros, observando la interferencia y cambiando las diferencias de los caminos de los fragmentos del rayo desdoblado, podremos, de veras, medir el desplazamiento y la longitud que nos interesan, al calcular el número de alternancias de luz y oscuridad.

Hemos dado la descripción del principio que constituye la base de las mediciones de interferencia descubierto ya en 1815 por el físico francés Agustín Fresnel (1788—1827). Examinemos ahora los métodos que sirven de base para la acción de los interferómetros con cuya ayuda se desdobla el rayo y se crean las diferencias de marcha entre las partes desintegradas del rayo.

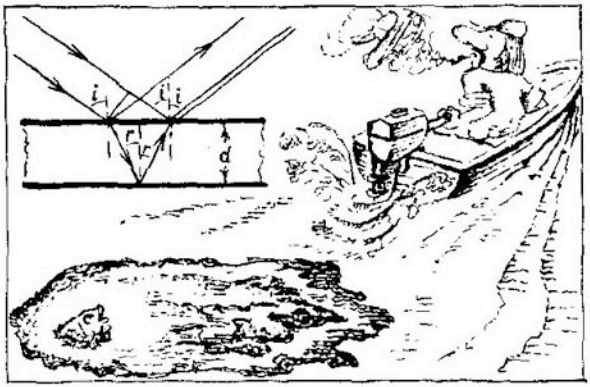


Fig. 2.5.

Analicemos más detenidamente la interferencia de los rayos de luz reflejados de las partes exterior e interior de una lámina transparente o de una película. Este fenómeno merece que se le preste atención tanto por su significación práctica, como por la razón de que se observa en la naturaleza. Además, basándose en este ejemplo, se esclarecen con facilidad muchos importantes conceptos que utilizamos en la descripción de las ondas luminosas, así como de otras ondas electromagnéticas.

La fig. 2.5 permite calcular el desfasaje entre dos rayos de este tipo. La diferencia de fase se determina por la diferencia de marcha, es decir, por la diferencia de caminos recorridos por dos rayos. Como se ve en el dibujo, la diferencia de marcha $x = 2d \cos r$. Pero, ¿cómo pasar de la diferencia de marcha de los rayos a la diferencia de fase que determina si dos ondas se intensificarán o se debilitarán una a otra? Hablaremos con el lector a quien no asusta

la fórmula del coseno. La oscilación del vector luminoso en cualquier punto del espacio puede anotarse de la siguiente forma: $A \cos 2\pi\nu t$. El desfasaje al ángulo φ significa la necesidad de adicionar este ángulo al argumento del coseno. Si deseamos comparar las fases de los puntos de una misma onda separados por una distancia x, conviene tomar en consideración cuántas longitudes de onda caben en este tramo y multiplicar el número obtenido por 2π. Esta magnitud será, precisamente, el desfasaje. Así pues, $\varphi = 2\pi x/\lambda$.

Ahora regresemos a la interferencia de los rayos en la placa. Hemos escrito ya la expresión para la diferencia de marcha. Por consiguiente, lo único que nos queda es dividir esta magnitud por λ. Pero... stop. ¿Quién nos ha dicho que la longitud de onda luminosa en el vacío y en la placa transparente es la misma? Por el contrario, tenemos todos los fundamentos para sospechar que a la onda le ocurre algo cuando ésta pasa de un medio a otro. No olvide que existe el fenómeno de dispersión: los fotones de distintas frecuencias se comportan de una manera diferente. La frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de su propagación están relacionadas por la igualdad $c = \nu\lambda$. ¿Cuáles de estas magnitudes varían cuando la onda va a parar a otro medio? Es la experiencia la que contesta a esta pregunta. Es posible medir directamente la velocidad de propagación de la onda en el cuerpo, cerciorándose de que el índice de refracción —que obliga a la onda a cambiar la dirección de su movimiento en el caso de incidir de una manera oblicua sobre la superficie de separación de dos medios— es igual a la relación entre las velocidades de propagación de la luz en éstos. Cuando uno de los medios es aire (o, más exactamente, el vacío)

$$n = c/v,$$

donde c es la designación adoptada de la velocidad de la luz en el vacío, y v, la velocidad de propagación en un medio. Bueno, ¿qué más tenemos? ¿Cuál de los dos pará-

metros —la frecuencia o la longitud de onda— varía, al pasar la luz del aire al medio en cuestión? Para poder explicar los resultados de los experimentos relacionados con la interferencia es necesario suponer que la frecuencia del fotón queda invariable, mientras que la longitud de onda cambia. Por esta causa, para el índice de refracción es válida también la fórmula

$$n = \lambda_0/\lambda,$$

donde λ_0 es la longitud de onda en el aire.

Ahora ya disponemos de todos los datos necesarios para anotar la diferencia de fase entre los rayos en el experimento con la lámina que describimos. Por cuanto uno de los rayos pasaba por el aire y el otro por el vidrio, la diferencia de fase será igual a

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nx = \frac{4\pi}{\lambda_0} nd \cos r.$$

En resumen, ¿qué se puede medir al estudiar la interferencia de los rayos en la lámina? La fórmula nos da respuesta a esta pregunta. Si se conoce el espesor se puede determinar el índice de refracción del material. Si se conoce el valor de n, entonces se puede hallar con una precisión muy grande (correspondiente a fracciones de longitud de onda luminosa) el espesor y, finalmente, es posible medir las longitudes de onda de distinta «cromaticidad».

Si el espesor de la lámina es variable, su material en todas las partes homogéneo y el ángulo de incidencia prácticamente el mismo para el sector examinado de ésta, entonces, la interferencia se pondrá de manifiesto en forma de las llamadas bandas de igual espesor. En una lámina irregular aparecerá un sistema de bandas oscuras y claras (o, en el caso de luz blanca, irisadas, ya que los fotones de cada cromicidad se comportarán de su manera) que perfilarán los lugares de igual espesor. Esto explica el porqué de los dibujos coloreados que con tanta frecuencia

vemos en las películas de petróleo o aceitosas a flor de agua.

Unas bandas muy hermosas de igual espesor se observan fácilmente en las películas jabonosas. Hagan un cuadro de alambre, sumérjanlo en una solución de jabón y sáquenlo. La solución jabonosa se escurre y en la parte superior la película será más delgada que en la inferior. En la película aparecerán franjas coloreadas horizontales.

El método de interferencia se aplica ampliamente para medir distancias pequeñas o variaciones pequeñas de distancias. Dicho método permite notar los cambios de espesor menores que centésimas fracciones de longitud de onda luminosa. En las mediciones interferenciales de las irregularidades de la superficie del cristal se logra alcanzar una precisión del orden de 10^{-7} cm.

Este método se utiliza de un modo amplio en la industria óptica. Si, por ejemplo, es necesario comprobar la calidad de la superficie de una placa de vidrio, esto se efectúa examinando las bandas de igual espesor del cuño aéreo creado por la placa ensayada y otra placa con una superficie perfectamente plana. Si estas dos placas se aprietan una contra otra por un extremo, se forma un cuño aéreo. Si las dos superficies son planas, entonces, las líneas de igual espesor serán rectas paralelas.

Figurémonos que en la placa que se ensaya existe una depresión o una prominencia. En este caso las líneas de igual espesor se torcionarán contorneando el lugar defectuoso. Al cambiar el ángulo de incidencia de la luz las bandas se mueven por uno o por otro lado en dependencia de si el defecto sea una depresión o una prominencia. En la fig. 2.6 se representa el aspecto del campo del microscopio en estos casos. Ambas figuras corresponden a muestras con defectos. La primera muestra tiene el defecto dispuesto a la derecha, al extremo mismo, y la segunda lo tiene a la izquierda.

Mediciones exactas de los índices de refracción de la sustancia pueden llevarse a cabo por medio de refractó-

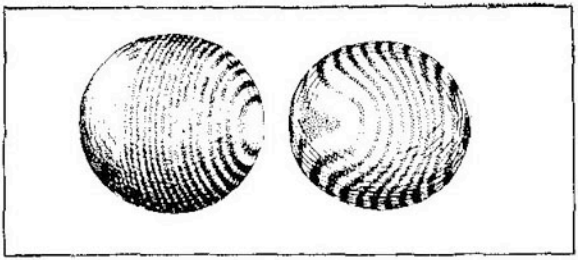


Fig. 2.6.

metros interferenciales. En estos instrumentos se observa la interferencia entre dos rayos los cuales, en la medida de lo posible, están alejados uno del otro.

Supongamos que el camino de uno de los rayos lo intercepta un cuerpo de longitud l y de índice de refracción n. Si el índice de refracción del medio es n_0, la diferencia óptica de la marcha cambiará en $\Delta = l\,(n - n_0)$. Dos rayos se hacen convergir en un punto con la ayuda de una lente enfocadora. Entonces, ¿qué cuadro se observará en el anteojo? Un sistema de bandas claras y oscuras. Sin embargo, éstas no son bandas de igual espesor que se ven a simple vista. El sistema de bandas que aparece en el refractómetro tiene otro origen. Es que el haz luminoso inicial no es igualmente paralelo sino un poco divergente. En consecuencia, los rayos que forman el cono incidirán sobre la placa bajo ángulos algo diferentes.

Los acontecimientos interferenciales se realizarán de la misma manera para los rayos con igual inclinación. Estos, precisamente, se concentrarán en un lugar del plano focal del anteojo. Si la diferencia de marcha entre las partes desdobladas del haz varía, las bandas se pondrán en movimiento. Al variar la diferencia de marcha en

la magnitud Δ, a través del ocular del anteojo pasarán Δ/λ bandas.

La exactitud del método es muy grande, ya que se capta sin dificultad un desplazamiento igual a 0,1 de la banda. Para este desplazamiento $\Delta = 0{,}1\lambda = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm, lo cual, en una longitud $l = 10$ cm, permitirá registrar la variación del índice de refracción en $0{,}5 \cdot 10^{-6}$.

Ahora es preciso referirnos al interferómetro de otro tipo que no hace uso del fenómeno de refracción. Se trata del interferómetro construido por el físico norteamericano Alberto Michelson (1852—1931). Es difícil sobreestimar el papel que dicho instrumento desempeñó en la historia de la física (hasta me atreveré a hacer una afirmación más fuerte: en la historia del pensamiento humano). Valiéndose de este interferómetro por primera vez se ha establecido el hecho de extraordinaria importancia: la velocidad de la luz en las direcciones a lo largo y a través de la órbita terrestre es igual. Esto significa que la velocidad de la luz no se suma a la velocidad de movimiento de la lámpara que da un destello luminoso siguiendo las reglas de acuerdo con las cuales la velocidad de la bala se suma a la velocidad de movimiento de un tirador con su escopeta. El descubrimiento de este notorio hecho condujo a la constitución de la teoría de la relatividad y a la revisión cardinal del sentido de los conceptos científicos fundamentales: de la longitud, tiempo, masa y energía. Pero de ello hablaremos más tarde. En cuanto al interferómetro de Michelson, de él vale la pena hablar inmediatamente por cuanto su significado se determina no sólo por el lugar que ocupa en la historia de la física, sino también por el hecho de que hasta el día de hoy los principios sencillos que forman la base de su estructura se utilizan para medir las longitudes y distancias.

En este instrumento, el haz paralelo de luz monocromática incide sobre la placa planoparalela P_1 (fig. 2.7) cuya parte rayada está cubierta de una capa semitransparente de plata. Dicha placa forma un ángulo de 45° res-

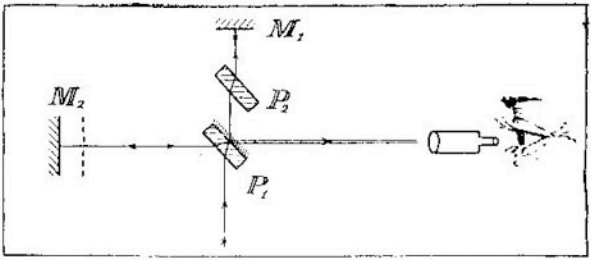


Fig. 2.7.

pecto al rayo incidente desde la fuente desdoblándolo en dos, uno de los cuales va paralelamente al rayo incidente (hacia el espejo M_1), y el otro, perpendicularmente a éste (hacia el espejo M_2). Los rayos separados inciden sobre ambos espejos de una forma perpendicular y regresan a los mismos puntos de la placa semitransparente de los cuales han partido. Cada rayo, al retornar del espejo, vuelve a desdoblarse en la placa. Una parte de la luz regresa a la fuente y otra parte va a parar al anteojo. En la figura se ve que el rayo que parte del espejo que se encuentra enfrente del anteojo pasa tres veces a través de la placa de vidrio con la capa semitransparente. Por esta razón, para asegurar la igualdad de los trayectos ópticos, el rayo que parte del espejo M_1 se deja pasar a través de la placa compensadora P_2 idéntica a la primera, pero sin la capa semitransparente.

En el campo visual del anteojo se observarán anillos circulares correspondientes a la interferencia en la capa aérea (cuyo espesor es igual a la diferencia de las distancias que separan los espejos del lugar de desdoblamiento de los rayos) de los rayos primarios que forman el cono. El desplazamiento de uno de los espejos (por ejemplo, del

espejo M_2, a la posición señalada por la línea de trazos) a un cuarto de longitud de onda corresponderá a la transición del máximo al mínimo, es decir, provocará el desplazamiento del cuadro en un semianillo. Este fenómeno puede registrarse nítidamente por el observador. De este modo, en los rayos ultravioleta la sensibilidad del interferómetro supera 100 nm.

La aparición en la escena de los láseres operó una revolución en la técnica de la interferometría.

El asunto reside en lo siguiente. El tiempo de radiación de un átomo es igual a 10^{-8} . . . 10^{-9} s. El acto unitario de radiación consiste en la emisión de un tren de ondas. Por cuanto el tiempo de radiación es tan pequeño, resulta que, a pesar de la gran velocidad de la luz, el tren es muy corto. Cuando desintegramos el rayo en fracciones, pueden interferir tan sólo dos partes de un mismo tren de ondas. Este hecho significa que un segmento de la sinusoide debe cubrirse esencialmente con otro segmento. Pero, para conseguirlo, es necesario, por supuesto, que la diferencia de marcha entre las partes desintegradas del rayo sea mucho menor que la longitud del tren.

La diferencia máxima de marcha entre los rayos para la cual puede observarse la interferencia lleva el nombre de longitud coherente. Para la luz son fracciones de milímetro.

Mas fíjense cuán radicalmente cambia la situación para la radiación de láser. Un láser de acción continua engendra fotones de radiación estimulada que emprenden el viaje en una misma fase. O bien, empleando el lenguaje ondulatorio, los trenes de ondas que parten de diferentes átomos se superponen unos a otros creando una especie de onda única. La longitud coherente, prácticamente, llega a ser ilimitada y, en todo caso, se mide en metros y kilómetros (como siempre, el ideal es inasequible; sin embargo, no voy a detenerme en los distintos factores que influyen en la longitud coherente).

Utilizando la luz de láser se pueden construir interferómetros que permiten resolver problemas que antes se consideraban irrealizables. Por ejemplo, con una fuente de luz ordinaria el espejo del interferómetro de Michelson puede desplazarse tan sólo a distancias del orden de milímetro. En cambio, si el rayo de luz es engendrado por el láser, entonces, el trayecto del rayo que incide sobre el espejo M_1 puede ser igual a varios centímetros, y el del rayo reflejado del espejo M_2 puede alcanzar decenas de metros.

Los interferómetros para el control de la esfericidad de las lentes pueden fabricarse con una sola superficie de comparación, mientras que, cuando se utiliza la luz corriente, al variar el radio de la lente sometida al ensayo era necesario cambiar también el patrón de comparación (ya que no se podía trabajar con grandes diferencias de marcha), sin hablar ya de que los cuadros interferenciales se hicieron incomparablemente más claros por cuya razón se analizan con facilidad y mayor precisión.

La posibilidad de pasar sin la compensación del trayecto óptico de uno de los rayos permite fabricar interferómetros de un tipo completamente nuevo. Se ofrece la posibilidad de realizar observaciones sobre el desplazamiento de las presas, la deriva geológica y las oscilaciones de la corteza terrestre. Al reflejar la luz de láser a partir de los objetos que se encuentran a grandes distancias, de modo que ésta se hace interferir con la inicial, se pueden efectuar mediciones exactas de la velocidad de movimiento de dichos objetos.

Instrumentos a base de láser

Por supuesto, podemos denominar instrumento el dispositivo que crea el rayo de láser, por cuanto aquél se emplea para el análisis, el control y las observaciones. Sin embargo, a diferencia de otros instrumentos ópticos, el láser tiene una importancia incomparablemente mayor

para la industria. La utilización de los láseres es tan universal que más de una vez volveremos a hablar sobre ésta. En este párrafo nos detendremos en las aplicaciones del láser para el tratamiento de los materiales. Si no se necesita una potencia grande, se puede emplear el láser compacto a base de neodimio. El corazón de este láser es, como ya hemos señalado, el vidrio con liga de neodimio. La barra de vidrio es de 50 mm de longitud y de 4 mm de diámetro. El destello de luz que produce el bombeo se da por una lámpara de xenón. Con el fin de evitar pérdidas de energía luminosa la lámpara y la barra están encerradas en una cámara cilíndrica refrigerada por agua.

Para las variadas aplicaciones de este instrumento o de otros semejantes son importantes las siguientes propiedades suyas: la posibilidad de localizar la energía sobre un área excepcionalmente pequeña; la posibilidad de una dosificación precisa de la porción de energía; la posibilidad de suministrar energía sin utilizar cualesquiera conductores o contactos.

Es característico el empleo del láser en la industria relojera. Todo el mundo conoce bien que los relojes se fabrican utilizando los «rubíes». Posiblemente, el lector no esté enterado para qué se necesitan en un reloj los pequeños rubíes, pero, sin duda alguna, sabe muy bien que su número determina la calidad del reloj. En las arandelas de rubí es necesario taladrar orificios. Sin la ayuda del láser esta operación requería varios minutos para cada piedra. En la actualidad, el proceso está totalmente automatizado ocupando fracciones de segundo. Si se tiene en cuenta que el número de piedras necesarias para la industria se mide en muchos millones por año, llega a ser perfectamente evidente el valor de esta aplicación del instrumento.

Para los mismos fines sirve el láser en la industria de diamantes. Al fabricar piedras diamantinas para el trefilado o la perforación, el láser se emplea como instrumen-

to con cuya ayuda a la piedra se puede dar cualquier perfil, practicando en ésta orificios ¡hasta de varios micrómetros de dimensiones!

Pero he interrumpido mi relato sobre la fabricación de relojes. Es que el láser presta a esta rama otro gran servicio: suelda el muelle al mecanismo del reloj. Queda completamente claro que también en todos los demás campos de la industria en los cuales es indispensable la soldadura por puntos (y la técnica moderna experimenta en este procedimiento la extrema necesidad) puede utilizarse con gran éxito el rayo de láser. Un mérito enorme de este finísimo rayo es el que no se debe preocuparse por la protección y enfriamiento de las partes vecinas al lugar destinado para soldar.

Ya se convirtió en trivial el empleo del instrumento de láser como un cuchillo para cortar cualesquiera contornos en cualquier material.

Mencionemos un campo inesperado de aplicación de los láseres: para la restauración de las esculturas de mármol. Lamentablemente, la atmósfera del siglo veinte está muy lejos de representar aire puro. Diferentes gases nocivos y, en primer lugar, el óxido de azufre, forman en el mármol una corteza negra. Esta corteza es porosa y, a resultas de ello, a semejanza de una esponja, absorbe humedad y dosis complementarias de sustancias nocivas. La eliminación de la corteza recurriendo a medios mecánicos y químicos puede llevar al deterioro de la escultura. En cambio, al operar con el láser en el régimen impulsional, se elimina la corteza sin tocar el mármol.

Haciendo uso del láser a base de dióxido de carbono se realiza el crecimiento de los cristales sin crisoles. Este proceso no es nuevo. Para semejante cultivo de cristales ya hace mucho se han aplicado corrientes de alta frecuencia, pero esta operación no se extendía a los dieléctricos cuya conductibilidad térmica es demasiado pequeña. Actualmente, con la ayuda de los láseres se hacen crecer, sin crisoles, los cristales de niobatos y de otras sustancias

de alta demanda. Es imposible sobrestimar la importancia del crecimiento de los cristales sin crisoles para las necesidades de la microelectrónica, ya que las millonésimas partes de impurezas pueden jugar un papel negativo, mientras tanto, resulta prácticamente imposible impedir que algunos átomos «nocivos» pasen del material del crisol al cristal.

No voy a detenerme en la descripción de la estructura del aparato correspondiente. En el libro 2 ya hemos tratado sobre el crecimiento de los cristales. De un modo análogo al caso de corrientes de alta frecuencia, el rayo de láser crea una pequeña zona fundida que transporta lentamente la sustancia al cristal en crecimiento. A mí me parece probable que la utilización del láser haga replegarse, en cierta medida, otros métodos de cultivo de los cristales.

Fotometría

Cada fuente de luz puede caracterizarse por la energía que aquélla irradia. Sin embargo, en muchas ocasiones nos interesa tan sólo aquella parte del flujo de energía que provoca la sensación visual. Como ya hemos señalado, esta particularidad la poseen las ondas electromagnéticas cuyas longitudes se encuentran dentro de los límites de 380 a 780 nm, aproximadamente.

La luz percibida por el cerebro se caracteriza por la luminosidad y el color. Si se comparan las sensaciones visuales producidas por la luz de igual intensidad, pero de diferente longitud de onda, resultará que al ojo se le presenta como más brillante la fuente de luz que engendra una onda de 555 nm de longitud lo que corresponde al color verde.

La percepción de la luz puede caracterizarse por la curva de eficacia luminosa (fig. 2.8) que indica (en unidades relativas) la sensibilidad del ojo normal respecto a las ondas de diferente longitud. Sin embargo, los técnicos

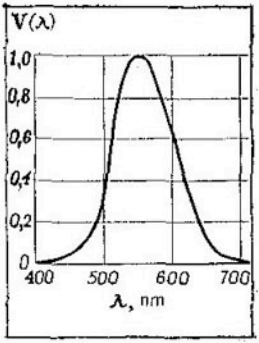


Fig. 2.8.

hacen caso omiso de esta curva dejando al ojo que dictamine sobre la intensidad integral de la luz. Siguiendo este camino, es necesario elegir cierta fuente patrón de la luz para, luego, comparar con ésta otras fuentes. Durante mucho tiempo la unidad de intensidad luminosa conservó la denominación de bujía, debido a que los primeros intentos de elección del patrón consistían, precisamente, en seleccionar cierta llama estandarizada de una bujía. Huelga decir cuán difícil resulta hacerlo.

El patrón internacional adoptado actualmente es el cuerpo negro incandescente. De material sirve el platino. El cuerpo negro emite luz irradiada por el platino calentado hasta la temperatura de fusión, es decir, hasta 2046 K, a través de un orificio pequeño.

La unidad de intensidad luminosa recibió el nombre de candela (del latín). La definición internacional trata de evitar hacer indicaciones directas a la temperatura de luminiscencia (para no introducir errores relacionados con la medición de la temperatura). Por esta razón la candela se determina de la siguiente forma: si se toma como fuente platino que se encuentra en estado de solidificación a pre-

sión atmosférica normal, entonces, el área de $(1/6)\cdot 10^{-5}$ m^2 da en la dirección perpendicular a la superficie una intensidad luminosa igual a una candela.

A unas distancias lo suficientemente grandes la fuente de luz se representa como punto. Precisamente en estos casos es conveniente medir la intensidad de la luz. Construyamos alrededor de la fuente puntual una esfera y separemos en esta superficie un elemento de área S. Al dividir S por el cuadrado de distancia del centro obtendremos el llamado ángulo sólido. La unidad de ángulo sólido es el estereorradiante. Si en la esfera de 1 metro de radio se corta el área $S = 1$ m^2, el ángulo sólido es igual a 1 estereorradiante.

Se denomina flujo luminoso la intensidad luminosa de una fuente puntual multiplicada por el valor del ángulo sólido.

Que no os deje confusos el hecho de que el flujo luminoso se reduzca a cero cuando se trata de rayos paralelos. En semejantes casos no se utiliza el concepto de flujo luminoso.

Por unidad de flujo luminoso se toma lumen que es igual al flujo emitido por una fuente puntual, de intensidad de 1 candela, al ángulo igual a 1 estereorradiante. El flujo luminoso total emitido por el punto hacia todos lados será igual a 4π lm.

La intensidad luminosa caracteriza la fuente de luz independientemente de su superficie. Al mismo tiempo, queda completamente claro que la impresión será distinta según sea la extensión de la fuente. Por esta razón se recurre al concepto de luminancia de la fuente. Esta es la intensidad luminosa referida a la unidad de superficie de la fuente de luz. La luminancia se mide en stilbs: 1 stilb es igual a 1 candela dividida por centímetro cuadrado.

Una misma fuente de luz traerá igual energía luminosa a la página de un libro abierto en dependencia del lugar en que esta fuente se encuentre. Para el lector es impor-

tante cuál es la iluminación de la parte de la mesa de escribir en que se halla el libro. Si las dimensiones de la fuente no son grandes (una fuente puntual), la iluminación es igual a la intensidad de la luz dividida por el cuadrado de distancia desde la fuente. ¿Por qué dividida por el cuadrado? La respuesta está clara: el flujo luminoso queda invariable dentro del ángulo sólido prefijado por muy grande que sea la distancia a la que nos alejamos del punto luminoso. En cambio, el área de la esfera y el área de la porción que corta el ángulo sólido prefijado crecerán inversamente proporcional al cuadrado de distancia. Esta simple regla se denomina ley de cuadrados inversos. Al aumentar de 1 a 10 m la distancia que separa el libro que leemos de la pequeña lámpara, disminuiremos 100 veces la iluminación de la página.

La unidad de iluminación es lux. Esta iluminación la produce el flujo luminoso igual a 1 lm incidiendo sobre el área de 1 m^2.

La iluminación en una noche sin luna es igual a 0,0003 lx. De este modo, cuando decimos «no se ven los dedos de la mano», definimos la iluminación de esos «dedos», precisamente. En una noche de luna la iluminación es igual a 0,2 lx. Para leer sin esforzar la vista se necesita una iluminación de 30 lx. Durante el rodaje de una película se conectan potentes proyectores llevando la iluminación de los objetos hasta 10 000 lx.

Todavía no hemos dicho nada acerca de los instrumentos que sirven para medir los flujos luminosos y las iluminaciones. En la actualidad, semejantes mediciones no constituyen un problema. De hecho, obramos precisamente así, como convendría proceder al dar la nueva definición de la candela. Medimos la energía que incide sobre la célula fotoeléctrica y la escala de dicha célula la graduamos en luz, teniendo en cuenta la curva de eficacia luminosa.

Los fotómetros existentes en el siglo pasado trabajaron a base del principio de comparación de las luminancias de

dos áreas contiguas iluminadas. Sobre una de éstas incidía la luz cuya intensidad deseábamos medir. Valiéndose de dispositivos no complicados el flujo luminoso se hacía disminuir en un número determinado de veces, de modo que, en fin de cuentas, la iluminación de las áreas contiguas fuese la misma.

Holografía

La creación de los láseres significa el devenir de una nueva época en el desarrollo de la ciencia y la técnica. Es difícil hallar una esfera del saber en que la radiación estimulada no descubra nuevas posibilidades.

En 1947 D. Gabor propuso utilizar la luz coherente para obtener la imagen del objeto por un método completamente nuevo. La nueva técnica que recibió el nombre de holografía se diferencia de un modo cardinal de la fotografía. La holografía resulta posible tan sólo debido a las particularidades de la radiación estimulada que la distingue de la luz ordinaria. Cabe recalcar otra vez que en la radiación de láser casi todos los fotones coinciden en lo que se refiere a todas sus características: la frecuencia, la fase, la polarización y la dirección de propagación. El rayo de láser se ensancha en ínfimo grado, o sea, es posible obtener un rayo extraordinariamente fino a grandes distancias de la fuente y al rayo de láser le es inherente una longitud coherente muy grande (longitud de tren de ondas). Debido a esta última circunstancia (que es, precisamente, importante para la holografía) es posible la interferencia de los rayos desdoblados con gran diferencia de marcha.

La parte superior de la fig. 2.9 explica la técnica de obtención de un holograma. El objeto observado se ilumina con un rayo de láser ancho y poco intenso (para no perjudicar el objeto). Un mismo rayo se disipa por el objeto y se refleja por el espejo que crea la llamada onda de referencia. Las dos se superponen. Tiene lugar la

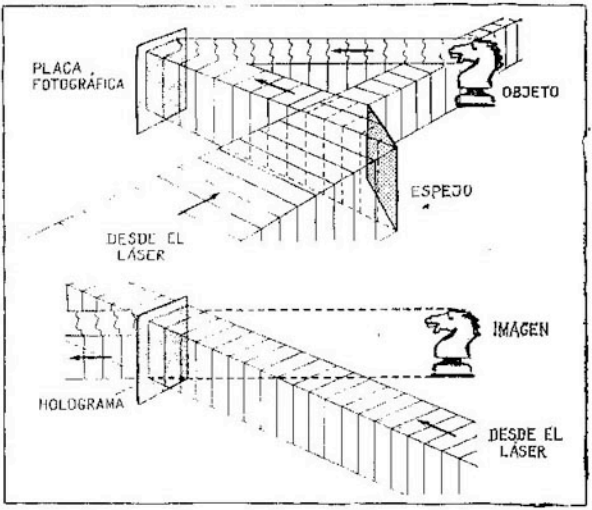


Fig. 2.9.

interferencia cuyo cuadro se fija por la placa fotográfica.

Echen una mirada a la fig. 2.10. En la parte superior se representa el objeto y por debajo de éste su «imagen». No, no nos hemos equivocado: esta compleja combinación de anillos oscuros y claros llamada holograma, es, efectivamente, una imagen del objeto, mas una imagen latente. El holograma contiene una información completa sobre el objeto, o, más exactamente, los datos completos sobre la onda electromagnética disipada por las piezas de ajedrez. Una fotografía no contiene semejantes datos omnímodos. La mejor de las fotos transmite con exactitud todos los datos sobre la intensidad de los rayos disipados.

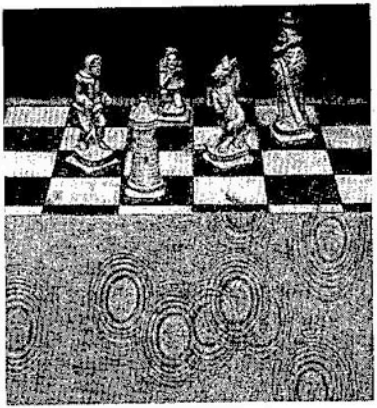


Fig. 2.10.

Sin embargo, la onda disipada por cualquier punto del objeto se caracteriza plenamente no sólo por su intensidad (amplitud), sino también por su fase. El holograma es un cuadro interferencial, y cada una de sus líneas claras y oscuras nos informa no únicamente sobre la intensidad, sino también sobre la fase de los rayos llegados del objeto a los puntos correspondientes de la placa fotográfica.

El holograma, al igual que cualquier placa fotográfica, se revela, se fija y se conserva tanto tiempo como se quiera. Cuando tengamos ganas de admirar el objeto «homografiado», irradiaremos, como se muestra en la parte inferior de la fig. 2.9. el holograma con la luz del mismo láser, restableciendo la disposición geométrica que tenía lugar durante la toma de la foto, o sea, dirigiremos el rayo de láser de la misma forma como iba el rayo reflejado del espejo. En este caso, en el lugar donde se encontraba el objeto aparecerá su imagen que, en condi-

ciones ideales, representará un cuadro idéntico a aquel que había visto el ojo.

No podemos tratar sobre la teoría de obtención del holograma. La idea principal consiste en que al iluminar el holograma se engendran ondas de dispersión con amplitud y fase idénticas a aquellas que crearon este holograma. Dichas ondas se unen en un frente de ondas idéntico a aquel que formó el holograma. Tiene lugar una reconstrucción original de la onda, si el holograma se ilumina en las mismas condiciones en que se iluminaba el objeto. Gracias a esta circunstancia se crea la imagen del objeto.

Las investigaciones en el campo de holografía prosiguen. Hoy en día existe la posibilidad de obtener imágenes en color. Es posible mejorar los resultados tomando varios hologramas desde diferentes posiciones. Por fin (y esto es, acaso, lo más importante), resulta que se puede examinar los hologramas sin recurrir al láser.

Hay libros que examinan el objeto de holografía detalladamente. La holografía merece que se le preste atención por la razón de que es un método de gran capacidad para almacenar la información tridimensional sobre el objeto. En este ámbito la última palabra todavía no se ha pronunciado, y el futuro mostrará en qué medida la holografía se implantará en la vida cotidiana y en la técnica.

Capítulo 3
Radiación electromagnética dura

Descubrimiento de los rayos X

A los rayos X corresponde la radiación que ocupa la porción del espectro electromagnético desde varias decenas hasta centésimas partes de nanómetro. Rayos más duros, es decir, de longitud de onda más corta, se denominan rayos gamma.

Como ya hemos señalado, los nombres de las porciones del espectro electromagnético son bastante convencionales. Al emplear uno u otro término no nos guiamos tanto por el valor de la longitud de onda, como nos atenemos al carácter de la fuente de radiación. En la mayoría de los casos, el término «rayos X» se aplica a la radiación que surge al chocar el flujo de electrones contra un obstáculo.

Guillermo Conrado Roentgen (1845—1923) descubrió este tipo de radiación el 8 de noviembre de 1895. En aquellos años muchos físicos del mundo investigaban los flujos de electrones que aparecían en tubos de vidrio bombeados (algunos de estos tubos se representaron en la fig. 2.6 del libro 3). En un recipiente se soldaban dos electrodos. A éstos se suministraba alta tensión. Hace bastante tiempo se sospechaba que desde el cátodo de semejante tubo se propagaban ciertos rayos. Ya en los albores del siglo XIX diferentes investigadores observaban destellos en el interior del tubo y la luminiscencia del vidrio. Los experimentos de Guillermo Hittorf (1824—1914) y de Guillermo Crookes (1832—1919) demostraron con plena claridad que se trataba de unos rayos. En todos

los libros de texto se publicó la fotografía del tubo de Crookes con la cruz; el científico inglés creó este tubo en 1879, diez años después de Hittorf. La cruz proyectaba sobre el vidrio una sombra bien visible. Este elegante experimento demostraba que desde el cátodo partían ciertos rayos y éstos se propagaban en línea recta. Cuando los rayos incidían sobre el vidrio éste fosforecía, mientras que la fina capa de metal absorbía la radiación.

El hecho de que los rayos catódicos no son sino el flujo de electrones lo demostró en 1897 J. J. Thomson. Valiéndose del método cuya exposición se da en el libro 3, logró determinar la relación entre la carga y la masa del electrón. Transcurrieron otros 10 ó 15 años y quedó claro que el electrón resulta ser una partícula pequeñísima de electricidad.

Pero nos repetimos y apartamos de la materia. Ahora nos interesa el descubrimiento hecho por Roentgen. Sin embargo, con esta repetición quisiéramos subrayar que el descubrimiento de Roentgen se anticipaba a la comprensión de la naturaleza de los rayos procedentes del cátodo. Hablando con propiedad, precisamente debido a la falta de claridad en este campo, Roentgen trabajó con diferentes tubos que se distinguían por la disposición mutua de los lugares de soldadura de los electrodos y la forma de la envoltura de vidrio.

Se conocen bien los más insignificantes pormenores de los acontecimientos de la tarde del 8 de noviembre de 1895. Roentgen echó sobre el tubo un trozo de tela negra, apagó la luz en la habitación y se preparó para ir a casa, olvidando desconectar el interruptor. Al echar una mirada al aparato con que trabajó, el científico prestó atención a que centelleaba la pantalla con cianuro de bario que se encontraba junto al tubo y poseía la capacidad de luminiscencia. Roentgen regresó y desconectó el interruptor; el centelleo desapareció. Conectó el interruptor otra vez, la pantalla volvió a centellear. El físico sabía que en el tubo de aquella construcción los rayos catódicos no podían

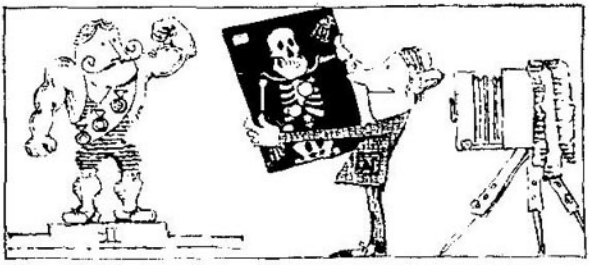


Fig. 3.1.

pasar a través de la tela que lo cubría, salvando, además, una gran capa de aire. Por consiguiente... por consiguiente, se dejó ver una nueva radiación, desconocida hasta aquel entonces.

La primera información sobre su descubrimiento Roentgen la envió a la revista a finales del año. Durante este lapso supo estudiar tan detalladamente las propiedades de los nuevos rayos que, en lo que se refiere a los rayos X, no se descubrió, en esencia, nada nuevo hasta el año 1912 cuando se halló la difracción de los mismos (sobre este tema hablaremos más tarde). El propio Roentgen denominó la radiación descubierta por él «rayos X», pero en las publicaciones en ruso se da preferencia al nombre de «rayos Roentgen».

La propiedad más admirable de los rayos X, la cual Roentgen investigó y comentó en primer lugar, fue su capacidad de pasar a través de los materiales no transparentes para la luz. (La fig. 3.1 nos recuerda que semejantes dibujos chistosos aparecieron en gran cantidad pasados nada más que dos o tres meses después de las primeras publicaciones de Roentgen.)

La capacidad de penetración de los rayos X presta servicios inapreciables a la medicina. También se ofrece la posibilidad de detectar defectos en los artículos industriales. Los sorprendentes resultados proporcionados por la roentgenografía son la consecuencia del hecho de que las sustancias diferentes por su densidad absorben de distinta forma los rayos X. Cuanto más ligeros son los átomos de la sustancia tanto menos rayos absorben éstos.

Bastante pronto fue establecido que la permeabilidad de los cuerpos respecto a los rayos se acrecienta con el aumento de la tensión en el tubo. Las tensiones que se utilizan habitualmente para las radiografías se encuentran dentro de los límites desde varias decenas hasta varios centenares de kilovoltios.

Al estudiar las propiedades de los rayos X los investigadores establecieron que la causa de su aparición es el frenado del flujo de los electrones por un obstáculo. Es curioso que durante un largo período el tubo de Roentgen se haya fabricado con tres electrodos. Frente al cátodo se soldaba el «anticátodo» contra el cual, precisamente, chocaban los electrones. El ánodo se disponía a un lado. Al cabo de varios años se comprendió que ésta era una complicación innecesaria, de modo que, actualmente, en el tubo se sueldan dos electrodos. El haz de electrones se frena por el ánodo cuya superficie, de ordinario, se hace sesgada. En este caso, el haz de los rayos X se dirige en el sentido correspondiente. Si la superficie del ánodo encuentra el haz electrónico bajo el ángulo recto, los rayos se propagarán del ánodo por todos los lados lo que conducirá a la pérdida de intensidad.

La radiografía por medio de rayos X hizo una verdadera revolución en la industria y, sobre todo, en la medicina. En la actualidad, la técnica radiográfica se ha perfeccionado sumamente. Al cambiar la disposición del objeto estudiado respecto al tubo de rayos X es posible obtener varios cuadros con cuya ayuda no sólo se logra establecer la posición del defecto en la proyección, sino

también determinar la profundidad en que se encuentra.

Según sean los materiales o tejidos que se someten a la investigación es racional aplicar a veces una radiación más dura (o sea, *más* penetrante) y, a veces otra, más blanda. La tarea primordial es conseguir el contraste: es necesario ver el defecto que, por su densidad, se distingue aunque en una medida insignificante del material básico.

La ley de la absorción de los rayos X, al igual que la ley de la absorción de cualquier radiación es bastante evidente. Lo que nos interesa es cómo cambiará la intensidad del rayo (cabe recordar que la intensidad es la energía referida a la unidad de tiempo y la unidad de área) después de pasar a través de una placa de espesor *d*. Por cuanto escribo este libro para los lectores que no conocen el cálculo integral, me veo obligado a limitarme con la formulación de esta ley para el paso del rayo a través de placas de pequeño espesor. El espesor es «pequeño» en el caso de que la intensidad disminuye de un modo insignificante, digamos, en un 1%. Para este ejemplo la ley resulta ser simple: la parte de la radiación absorbida es directamente proporcional al espesor de la placa. Si la intensidad ha disminuido desde el valor I_0 hasta el valor I, esta sencilla regla se anota de la siguiente forma:

$$\frac{I-I_0}{I} = \mu d.$$

El coeficiente de proporcionalidad μ se denomina coeficiente de absorción.

He aquí una simple pregunta que muchas veces ponía en los exámenes: ¿en qué unidades se mide el coeficiente de absorción? No es difícil pensarlo. Las unidades de medida deben ser iguales en ambos miembros de la igualdad. Es una cosa clara. Pues no se puede decir, en modo alguno, qué es más: 10 kg ó 5 m. Se pueden comparar kilogramos con kilogramos, amperios con amperios, ergios con ergios, etc., etc. Por consiguiente, en cualquier

igualdad, en ambos miembros deben hallarse números que se expresan en las mismas unidades.

Pero, en el primer miembro de nuestra igualdad está escrita la así llamada magnitud adimensional. Al decir que la parte de absorción de la radiación es igual a 1/30 ó 0,08, hemos dicho con ello todo. Las unidades de medida se «redujeron» al dividir la intensidad por la intensidad. Mas siendo así, también en el segundo miembro de la igualdad debe hallarse una magnitud adimensional. Por cuanto los espesores se miden en centímetros (u otras unidades de longitud), el coeficiente de absorción se expresa en centímetros inversos, es decir, en cm^{-1}.

Supongamos que el rayo pasa a través de una placa de 10 cm de espesor, perdiendo tan sólo 1% de intensidad. El primer miembro de la igualdad resulta ser de 1/100. En consecuencia, en este ejemplo el coeficiente de absorción es igual a 0,001 cm^{-1}. Ahora bien, si los rayos son blandos y pierden 1% de energía al atravesar apenas una hoja de un micrómetro (0,0001 cm) de espesor, entonces, el coeficiente de absorción será igual a 100 cm^{-1}.

Los físicos no disponen de una buena teoría para establecer la fórmula del coeficiente de absorción. Sólo indicaré que el coeficiente de absorción es proporcional, aproximadamente, al cubo de longitud de onda de la radiación de Roentgen y al cubo del número atómico de la sustancia a través de la cual pasa el rayo.

Por cuanto las longitudes de onda de los rayos *X* son muy pequeñas, resulta que las frecuencias de oscilación de las ondas electromagnéticas son grandes. Esta circunstancia significa que el cuanto $h\nu$ de radiación de Roentgen porta una gran energía. Esta energía no sólo es suficiente para las reacciones químicas que provocan el ennegrecimiento de la emulsión de la placa fotográfica y producen el centelleo de las pantallas fosforescentes (los rayos luminosos también son capaces de hacerlo), sino que basta, de sobra, para destruir, además, las moléculas. En otras palabras, los rayos X ionizan el

aire y otros medios a través de los cuales pasan.

Ahora cabe decir varias palabras acerca de los rayos gamma. Este término se utiliza cuando se trata de una radiación de onda corta que surge durante la desintegración radiactiva. Adelantándonos, diremos que los rayos gamma emanan de las sustancias radiactivas naturales, así como se engendran por los elementos artificiales. Por supuesto, en un reactor nuclear se crea la radiación gamma. Rayos gamma fuertes y muy duros aparecen durante la explosión de la bomba atómica.

Debido a que los rayos gamma pueden tener una longitud de onda muy pequeña, el coeficiente de su absorción también puede ser muy pequeño. Así, por ejemplo, los rayos gamma que se emiten durante la desintegración del cobalto radiactivo son capaces de penetrar a través de decenas de centímetros de acero.

La radiación electromagnética de onda corta capaz de destruir moléculas, en dosis considerables resulta ser muy peligrosa para el organismo. Esta es la razón de que se necesita protección contra los rayos X y gamma. En la mayoría de los casos con este fin se utiliza plomo. Las paredes de los gabinetes de radiología se recubren de enlucido especial que contiene sales de bario.

Los rayos gamma, al igual que los rayos X, pueden utilizarse para la radiografía. Habitualmente, se recurre a los rayos gamma de las sustancias radiactivas que no son sino «cenizas» del combustible nuclear. Su ventaja, en comparación con los rayos X, es la mayor capacidad de penetración, y, además —y esto es lo principal— dan la posibilidad de utilizar como fuente de radiación una pequeña ampolla que puede situarse en los lugares inaccesibles para el tubo de rayos X.

Análisis estructural por difracción de rayos X

En 1912 Roentgen fue catedrático de física en la Universidad de Munich. En su cátedra se discutían de

una manera incansable los problemas concernientes a la naturaleza de los rayos X. Cabe señalar que Roentgen, siendo él mismo físico experimentador, tenía en gran estima la teoría. En la cátedra de física de la Universidad de Munich colaboraban muchos teóricos talentosos los cuales se devanaban los sesos tratando de comprender qué representan los rayos X.

Se sobrentiende que se hacían intentos de esclarecer la naturaleza de los rayos X investigando su paso a través de una red de difracción. Recordemos al lector qué es la red de difracción con cuya ayuda se demuestra unívocamente la naturaleza ondulatoria de la luz y, además, se determina con suma precisión la longitud de onda de tal o cual radiación.

Uno de los métodos de preparación de esta red consiste en que en una placa de vidrio cubierta con una capa de aluminio se trazan estrías por medio de una cuchilla blanda de marfil, empleando máquinas especiales. Las distancias entre las estrías deben ser estrictamente iguales. Una buena red debe poseer un pequeño período (el ancho total de la rendija y del espacio no transparente) y gran cantidad de estrías. Se logra llevar esta cantidad a centenares de miles, con la particularidad de que a 1 mm corresponden más de mil estrías.

Mediante una lente se consigue que una fuente puntual luminosa de gran intensidad emite un haz paralelo de luz que incide sobre la red formando un ángulo recto. De cada rendija los rayos parten por todos los lados (en otras palabras, cada rendija se convierte en origen de una onda esférica). Sin embargo, solamente en las direcciones elegidas las ondas provenientes de todas las rendijas serán cofásicas. Para la ayuda mutua es necesario que la diferencia de marcha sea igual al número entero de longitudes de onda. Los rayos intensos partirán formando el ángulo α en direcciones que se subordinan a la condición

$$a \operatorname{sen} \alpha = n\lambda,$$

donde n es un número entero, y a, el período de la red. El lector deducirá fácilmente esta fórmula sin la ayuda del autor.

El número entero n se denomina orden del espectro. Si sobre la red incide un rayo monocromático, obtendremos en el plano focal del ocular varias líneas separadas por espacios oscuros. Si la luz se compone de ondas de diferente longitud, entonces, la red crea varios espectros: de órdenes primero, segundo, etc. Cada espectro posterior resultará más dilatado que el anterior.

Por cuanto la longitud de onda luminosa es del mismo orden que la distancia entre las rendijas, las redes de difracción descomponen la luz (y, además, no sólo la luz visible, sino también la ultravioleta y, especialmente bien, la infrarroja) en espectros. Valiéndose de estas redes se puede realizar el análisis espectral detallado.

Sin embargo, cuando se trataba de los rayos X, las redes de difracción se comportaban como un sistema de puertas abiertas. Los rayos X las atravesaban sin desviarse. Se podía suponer que los rayos X son un flujo de partículas. Pero tampoco se prohibía pensar que la radiación de Roentgen es la misma radiación electromagnética que la luz y que sólo la longitud de onda λ es mucho más corta. Efectivamente, supongamos que λ es muy pequeña. En este caso, resulta que de acuerdo con la condición de la difracción de la red óptica lineal a $\operatorname{sen} \alpha = n\lambda$, todos los n rayos que se dirigen formando ángulos de desviación α, prácticamente se confundirán y la difracción no se advertirá. Pero es imposible preparar una red de difracción con rendijas separadas unas de otras por distancia a igual a millonésimas partes de micrómetro. ¿Cómo proceder, entonces?

El físico Max Laue (1879—1960), ya en el mismo principio de su actividad científica, estaba seguro de que los rayos X representaban una radiación electromagnética. Un cristalógrafo, conocido suyo, con el que conversaba con frecuencia, tenía la firme convicción de que el cristal

representa una red tridimensional de átomos. En una de las numerosas pláticas sobre los temas científicos Laue decidió poner en correspondencia su idea acerca de la naturaleza de los rayos X con la concepción del cristal como red. «¿Y si resulta que las distancias entre los átomos en el cristal y la longitud de onda de los rayos X son magnitudes de un mismo orden?» —pensó Laue.

¿Puede la red tridimensional sustituir la red lineal de rendijas? La respuesta a esta pregunta no fue evidente; sin embargo, Laue decidió hacer una prueba. El primer experimento fue simple al extremo. Se diafragmó un haz de rayos X. En el camino de los rayos se colocó un cristal grande y junto con el cristal se situó una placa fotográfica. Verdad es que no estaba del todo claro dónde poner la placa, por cuanto el cristal no es, ni mucho menos, una red lineal. El lugar para la placa fue elegido inadecuadamente, y durante cierto tiempo el experimento fallaba. Es curioso que la placa estuviese llevada a la posición conveniente por casualidad, debido a una equivocación.

Por supuesto, esta casualidad no jugó un papel esencial en el descubrimiento. Es que Laue, paralelamente a los intentos de descubrir el fenómeno en el experimento, se dedicó a elaborar la teoría de este fenómeno. Pronto, logró extender la teoría de la red lineal de difracción al caso tridimensional. De la teoría derivaba que los rayos de difracción aparecerían solamente para algunas orientaciones determinadas del cristal respecto al rayo incidente. De la teoría se infería también que los más intensos debían ser los rayos desviados bajo un ángulo pequeño. De aquí se deducía que la placa fotográfica debía colocarse detrás del cristal, perpendicularmente al rayo incidente.

Entre los primeros que prestaron atención al fenómeno descubierto se encontraron los ingleses: padre e hijo Bragg. El padre se llamaba William Henry y el nombre del hijo era William Lawrence. Ellos, inmediatamente, repitieron el experimento de Laue, dando a su teoría una interpretación muy sencilla y patente, y demostraron en

un gran número de simples ejemplos que el descubrimiento de este científico puede utilizarse como método de estudio de la estructura atómica de la sustancia.

Demos a conocer al lector las ideas principales referentes al análisis estructural por difracción de rayos X (se emplea también la denominación análisis radiocristalográfico) y le expliquemos las nociones del método de determinación de la estructura del cristal, guiándose por el cual pueden medirse las distancias entre los átomos con una precisión hasta de una centésima de angström, así como puede representarse el cuadro de disposición espacial de los átomos en la molécula y esclarecerse el carácter del empaquetamiento de las moléculas en el cristal.

Supongamos que el cristal se encuentra en un soporte especial y gira alrededor de cierto eje. El rayo X incide formando un ángulo recto con el eje de giro. ¿Qué ocurre en este caso? Examinemos los fenómenos difraccionales que se operan al incidir el rayo X sobre el cristal de tal modo como si el centro de dispersión fuese el nudo de la red.

Los Bragg, padre e hijo, demostraron que la dispersión de los rayos X por los nudos de la red es equivalente a una reflexión selectiva (es decir, que tiene lugar solamente para ciertos valores discretos del ángulo) peculiar de los rayos desde los sistemas de planos nodales en que puede dividirse la red.

Sea que el rayo que es una onda electromagnética de determinada longitud incide sobre el cristal, formando cierto ángulo con éste. Para distintos sistemas de planos este ángulo será diferente. Tenemos pleno derecho de suponer que cualquier plano atómico reflejará la onda de rayos X de acuerdo con la ley: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Sin embargo, existe una diferencia esencial respecto al rayo óptico. El rayo X, a diferencia de la luz, penetra profundamente en el seno del cristal. Esto significa que la reflexión del rayo tendrá lugar no sólo desde la superficie exterior, sino también de todos los planos atómicos.

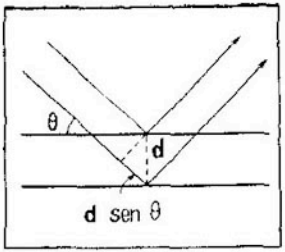


Fig. 3.2.

Examinemos uno de tales sistemas de planos que se caracterizan por la distancia interplanar d. Cada uno de éstos «reflejará» el rayo incidente bajo el mismo ángulo θ. Estos rayos reflejados deben interferir entre sí, y un intenso rayo secundario podrá engendrarse sólo en el caso de que los rayos reflejados de todos los planos de la familia se propaguen en una fase. En otras palabras, la diferencia de marcha entre los rayos debe ser igual al número entero de longitudes de onda.

En la fig. 3.2 se ha hecho una construcción geométrica de la cual se infiere que la diferencia de marcha entre los rayos reflejados vecinos es igual a $2d$ sen θ. Por consiguiente, la condición de difracción tendrá la siguiente forma:

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda.$$

Simultáneamente con los Bragg llegó a esta fórmula el cristalógrafo ruso G. V. Wulff por cuya razón la misma lleva el nombre de ecuación de Bragg—Wulff (sería más lógico llamarla ecuación de los Bragg y Wulff, pero está adoptada la primera denominación).

El cristal puede dividirse en sistemas de planos por un número de procedimientos tan grande como se quiera. Sin embargo, resultará eficaz para la reflexión tan sólo el

sistema con tal distancia interplanar y tal orientación respecto al rayo incidente para las cuales se cumpla la ecuación de Bragg—Wulff.

Es evidente que, si el rayo es monocromático (es decir, la onda electromagnética tiene una longitud determinada), para una posición arbitraria del cristal respecto al rayo la reflexión puede no tener lugar. Pero, al hacer girar el cristal, podemos, por turno, poner en posición de reflexión diferentes sistemas de planos. Precisamente este método de trabajo resultó ser el más adecuado para los fines prácticos.

En lo que se refiere al experimento de Laue, su éxito estaba predeterminado por el hecho de que sobre el cristal incidía el «espectro blanco» de los rayos X, es decir, un flujo de ondas cuyas longitudes estaban distribuidas de una forma continua en cierto intervalo (véase a continuación). Esta es la causa de que, aunque en el experimento de Laue el cristal era inmóvil, los diferentes sistemas de planos resultaron en la posición de «reflexión» para las ondas de distinta longitud.

Hoy en día, el análisis estructural por difracción de rayos X está automatizado por completo. Un pequeño cristal (de 0,1 a 1 mm) se fija en un cabezal especial que puede hacer girar dicho cristal siguiendo el programa dado, colocando en la posición de reflexión uno tras otro todos los sistemas de planos. Cada plano reflector (así se dice para abreviar, con el fin de evitar la constante repetición de la palabra «sistema») viene caracterizado, en primer término, por su distancia interplanar, en segundo término, por los ángulos que forma con los ejes de la celdilla unidad del cristal (ante todo se miden las longitudes de las aristas y los ángulos entre las aristas de la celdilla y estas mediciones también se realizan automáticamente), y, en tercer término, por la intensidad del rayo reflejado.

Cuantos más átomos contiene la molécula tanto mayores son, naturalmente, las dimensiones de la celdilla

unidad. Junto con esta complejidad crece también el volumen de la información. Es que el número de los planos reflectores será tanto mayor cuanto mayor sea la celdilla. El número de las reflexiones medidas puede oscilar desde varias decenas hasta varios mil.

Hemos prometido dar a conocer al lector las ideas principales del análisis estructural por difracción de rayos X. Primero, por decirlo así, volvamos del revés el problema. Supongamos que la estructura del cristal se conoce en todos sus detalles. Esto quiere decir que sabemos el dibujo de los átomos, o sea, disponemos de datos sobre las coordenadas de todos los átomos que forman la celdilla unidad (renueven, por favor, en su memoria los datos sobre la estructura del cristal que hemos dado en el libro 2). Examinemos cualquier sistema de planos reflectores. Queda bastante evidente lo siguiente. Si la mayoría de los átomos del cristal corresponde a los planos que pasan a través de los nudos de la red, todos los átomos dispersarán los rayos X en una fase. Se engendrará un rayo reflector intenso. Ahora figúrense otro caso. Una mitad de los átomos cae sobre los planos nodales y otra mitad se encuentra precisamente en el medio entre los planos reflectores. Entonces, una mitad de los átomos dispersa el rayo incidente en una fase, y la otra mitad lo hace en fase opuesta. ¡Y no habrá reflexión!

Estos son dos casos extremos. En los demás casos obtendremos rayos de diversa intensidad. El instrumento de medida —éste se denomina difractómetro automático— es capaz de medir las intensidades de reflexión que se diferencian diez mil veces.

La intensidad del rayo está relacionada unívocamente con la disposición de los átomos entre los planos nodales. La fórmula que pone de manifiesto esta relación es demasiado compleja para que la citemos. Además, esto no hace falta. Lo expuesto con anterioridad respecto a los dos casos extremos es suficiente para que el lector dé crédito a la existencia de la fórmula en la cual la intensidad viene

representada en función de coordenadas de la totalidad de los átomos. Esta fórmula también toma en consideración la clase de los átomos, pues cuanto más electrones posee el átomo, con tanta mayor fuerza dispersa éste los rayos X.

Por supuesto, en la fórmula que relaciona la estructura y la intensidad del rayo reflejado entran también los datos acerca del plano reflector, así como acerca de las dimensiones de la celdilla unidad. Podemos escribir tantas ecuaciones de este tipo cuantas reflexiones se han medido.

Si la estructura se conoce, entonces, las intensidades de todos los rayos pueden calcularse y compararse con el experimento. ¡Pero éste no es el problema que tenemos que resolver! Tenemos que enfrentarnos con el problema inverso: por los datos sobre las intensidades de varias decenas o centenas, o bien de miles de reflexiones hallar las coordenadas de todos los átomos en la celdilla. A primera vista, puede parecer que, teniendo en cuenta las posibilidades que ofrecen actualmente los ordenadores no existe dificultad especial alguna en la resolución de este problema inverso. ¿Muchas ecuaciones? ¡Qué va! ¡La computadora sabrá hallar la resolución!

No obstante, el asunto dista mucho de ser tan simple. Los datos experimentales son las intensidades de los rayos. La intensidad es proporcional al cuadrado de amplitud. La fórmula de la relación de que hemos hablado es, en esencia, la fórmula de interferencia. Las ondas dispersadas por los átomos del cristal interfieren entre sí. Tiene lugar la adición de las amplitudes de las ondas dispersadas por todos los átomos. Se calcula la amplitud total, y la intensidad se halla elevando la amplitud al cuadrado. No cuesta trabajo alguno resolver semejante problema. Mas, ¿cómo resolver el inverso? ¿Extraer la raíz cuadrada de la intensidad con el fin de obtener la amplitud? Sí, es cierto. ¡Pero es que la raíz cuadrada lleva dos signos!

Espero que el lector comience a comprender lo complejo del problema. Ecuaciones de las cuales podemos hallar las coordenadas de los átomos las tenemos más que de sobra. Pero, en el segundo miembro de la ecuación se encuentran números que conocemos con la exactitud de hasta el signo.

Al parecer, el asunto no tenía remedio. En efecto, al principio, los investigadores ni siquera trataban de resolver el problema inverso. Procedían recurriendo al método de «pruebas y errores». Basándose en los datos sobre estructuras similares, adoptaban que la estructura desconocida debía tener precisamente tal aspecto. Calculaban las intensidades de una decena de rayos y comparaban el resultado con los datos del experimento. ¿Qué no hay nada parecido? No importa, adoptemos otro modelo de la estructura.

Para los casos simples, dicho modo de abordar el problema, aunque con dificultad, proporcionaba, a pesar de todo, resultados correctos. Sin embargo, cuando los «estructuralistas» (así llamaban en el argot científico a este grupo de investigadores) habían consumado, prácticamente, el estudio de todas las estructuras simples, tuvieron que recapacitar con enjundia la posibilidad de resolver el problema inverso.

A mediados de los años treinta se les ocurrió que podían «resolverse» (otra vez recurro al argot) incluso las estructuras complejas si se limitaban a estudiar aquellas moléculas que contenían gran número de átomos ligeros y un átomo pesado. El átomo pesado encierra muchos electrones y dispersa los rayos X con mucha mayor fuerza que los ligeros. Por lo tanto, en la primera y burda aproximación se puede considerar que el cristal consta tan sólo de átomos pesados. Si en la celdilla no hay más que un átomo, no costará trabajo determinar sus coordenadas por el método de «pruebas y errores». Entonces, hallaremos las coordenadas de este átomo y, suponiendo que solamente éste manda en el cristal, haremos la conjetura

que los signos de las amplitudes determinados para la estructura ficticia constituida tan sólo por átomos pesados son los mismos que para la estructura real.

Un descubrimiento importantísimo que cuenta ya con más de cuatro lustros de vida resultó ser el teorema sobre la existencia de una relación entre las amplitudes de reflexión de diferentes familias de planos. Así, por ejemplo, están relacionados entre sí los signos de las amplitudes de tres reflexiones desfasadas respecto al nudo de la celdilla en magnitudes α, β y $\alpha + \beta$. Resulta que en el caso de que el producto $\cos \alpha \cos \beta \cos (\alpha + \beta)$ supera 1/8 por su valor absoluto, éste, indispensablemente, lleva el signo positivo. El lector puede comprobarlo.

El desarrollo de esta idea condujo a los llamados métodos directos del análisis estructural. Incluso en los casos bastante complicados el instrumento experimental puede agruparse con un ordenador y la máquina «sacará a la superficie» la estructura del cristal.

Cuando los signos de las amplitudes de reflexión se hayan establecido, la determinación de las coordenadas de los átomos se convierte, como ya se ha señalado, en problema de resolución de gran cantidad de ecuaciones con muchas incógnitas. En este caso tiene gran importancia que el número de ecuaciones supere, por lo menos, diez veces o, mejor aún, cien veces el de coordenadas de átomos que se deben determinar.

No voy a exponer la técnica de solución de este sistema de ecuaciones. Se recurre al rodeo, y este camino se reduce a la construcción de las llamadas series de Fourier de densidad electrónica. Lamentablemente, la teoría de las series de Fourier y, además, con arreglo al problema de determinación de la estructura, puede exponerse tan sólo a un lector con preparación especial. Sin embargo, me parece que ni siquiera es necesario hacerlo. A medida de mis fuerzas he cumplido mi tarea, o sea, he explicado la esencia del método.

¿En qué forma entrega el físico — especialista en el

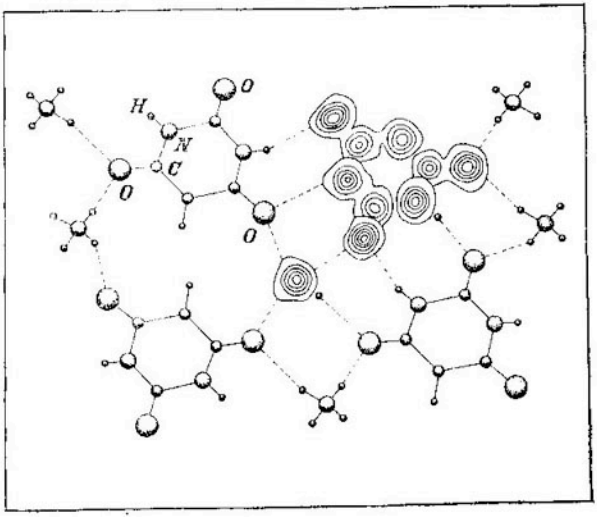


Fig. 3.3.

campo del análisis estructural por difracción de rayos X— los datos acerca de la estructura de la sustancia que necesita el químico? Permite formar idea sobre ello la fig. 3.3 en que se representa una estructura muy simple de la sustancia denominada barbiturato de amonio. Actualmente, la determinación de una estructura que por su complejidad no supera la mostrada es una tarea «para niños». Semejante estructura el autómata la determinará sin participación cualquiera del investigador. El ordenador puede también entregar el resultado en forma de números (valores de las coordenadas de los átomos), así como en forma de cuadros parecidos al insertado. Los átomos de

distintas clases químicas se designan con circulitos de diverso tamaño. Pero, si el investigador lo quiere, el ordenador proporcionará el cuadro de la densidad electrónica. Cada átomo se representa del mismo modo como los geógrafos contornean con líneas de iguales alturas los picos de las montañas. La diferencia consiste en que en nuestro caso las líneas cerradas no representan las alturas, sino curvas que indican la densidad de los electrones en el lugar dado. Y la cumbre del «pico montañoso» es el centro del átomo.

La figura mostrada representa una minúscula parte de la aportación que el método descrito por nosotros hizo en la ciencia. El éxito de este método es muy grande. Para la fecha, se han determinado las estructuras de más de 15 000 cristales, incluyendo varias decenas de estructuras de proteínas cuyas moléculas constan de muchos millares de átomos.

La determinación de la estructura de moléculas complejas proporciona los fundamentos de la química biológica y de la física biológica. Dichas ciencias, actualmente, viven un período tempestuoso de su desarrollo. De éstas se espera el descubrimiento de los secretos de la vida, de las enfermedades y de la muerte.

El análisis estructural por difracción de rayos X, a pesar de su imponente edad septuagenaria, sigue manteniéndose en la posición avanzada del frente de la ciencia.

Espectro de los rayos X

En el párrafo anterior hemos mencionado, de paso, que es posible encontrarse con el espectro «blanco» y con el rayo monocromático. ¿De qué modo puede esclarecerse el carácter del espectro de la radiación electromagnética dura? ¿En qué ocasiones ésta es blanca y en qué monocromática?

Si se diafragman los rayos X o los rayos gamma que parten de cualquier fuente (es decir, si se ponen en el

camino de la radiación dos obturadores con pequeños orificios), obligando a incidir el haz sobre un cristal, entonces, en el caso más general, se engendrarán varios rayos reflejados de los planos que se encuentran en la posición que satisface la ecuación de Bragg — Wulff. Si el cristal se dispone de tal manera que alguno de sus planos (que da una fuerte reflexión) coincida con el eje de giro del instrumento especial (espectrógrafo de rayos X), haciendo girar, luego, el cristal de tal manera que este plano se sitúe bajo el rayo incidente formando, consecutivamente, todos los ángulos θ, entonces, para cada posición del cristal, se reflejará la componente del espectro de longitud determinada de onda. Esta onda reflejada la podemos «captar» ya sea con la ayuda del contador de ionización, o bien, «cazando» el rayo en la película fotográfica. Este método permite, en primer lugar, crear un rayo monocromático de cualquier longitud de onda que se contiene en el espectro de radiación y, en segundo lugar, investigar el espectro de cualquier radiación.

En la fig. 3.4 se representa el espectro típico del tubo de rayos X con el ánodo de molibdeno (la tensión es de 35 kV). De un modo inmediato, se puede llegar a la conclusión de que existen ciertas dos causas que llevan a la creación del espectro de rayos X. En efecto, vemos que el espectro observado no es sino una superposición de los picos agudos sobre la curva continua. Está claro que el origen de estos picos se diferencia del de la curva continua.

Inmediatamente después de que había sido descubierto el fenómeno de difracción de los rayos X comenzaron las investigaciones de los espectros de estos rayos. Fue establecido lo siguiente. El espectro continuo no es característico para el material del ánodo y depende de la tensión. Su particularidad consiste en que se interrumpe de manera brusca para cierta longitud mínima de onda. En el sentido de ondas largas, al pasar por el máximo, la curva desciende suavemente y no se ve el «fin» del espectro.

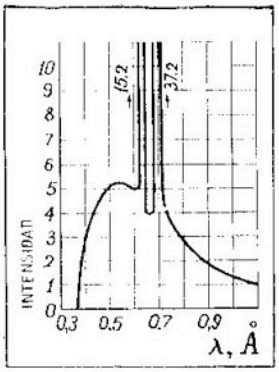


Fig. 3.4.

Aumentando la tensión en el tubo de rayos X, los investigadores demostraron que la intensidad del espectro continuo incrementa y la frontera se desplaza en el sentido de ondas cortas. Al mismo tiempo quedó establecida la siguiente igualdad muy sencilla para la longitud límite de onda:

$$\lambda_{\text{mín}} = 12{,}34/U.$$

En el lenguaje cuántico la regla obtenida se formula sin dificultad. La magnitud eU es la energía que acumula el electrón en su recorrido desde el cátodo hacia el ánodo. Es natural que el electrón no sea capaz de entregar más energía que esta magnitud. Si éste entrega toda su energía para la creación del cuanto de rayos X ($eU = h\nu$), entonces, después de sustituir los valores de las constantes, obtendremos, precisamente, la igualdad anotada anteriormente (λ, en angström, y U, en kilovoltios).

Puesto que surge un espectro continuo, de este hecho se desprende que los electrones, no obligatoriamente,

entregan toda su energía para crear rayos X. La experiencia demuestra que la mayor parte de energía del haz electrónico se transforma en calor. El rendimiento del tubo de rayos X es muy bajo. El ánodo se calienta de una manera fuerte, de modo que es necesario enfriarlo con un flujo de agua que se suministra al interior del mismo.

¿Existe una teoría que explica la aparición del espectro continuo de los rayos X? Sí, existe. Los cálculos que, lamentablemente, no podemos exponer, demuestran que de las leyes generales del campo electromagnético (de las ecuaciones de Maxwell) sobre las cuales hemos hablado en el libro 3, se deduce de una forma estricta el siguiente hecho: si los electrones se frenan, esto conduce al surgimiento de un espectro continuo de rayos X. La colisión con un cuerpo sólido es una circunstancia no esencial. Los electrones pueden frenarse por medio de anticampo, obteniéndose la radiación de rayos X continua, sin que en este juego participe el ánodo material.

Existe también otra posibilidad de encontrarse con el espectro continuo de rayos X. Recordamos que el espectro electromagnético continuo se emite por cuerpos incandescentes. En las condiciones terrestres no se nos ofrece la oportunidad de ver el espectro de semejante origen, ya que (compárese la fórmula que se da en la pág. 16) para la más alta temperatura del cuerpo incandescente (varios mil kelvin, y no hay cuerpo sólido alguno que pueda soportar temperaturas mayores) la longitud de onda de la radiación térmica será próxima a medio micrómetro. Pero no se debe olvidar la existencia del plasma. En el plasma artificial creado en las condiciones terrestres, como asimismo en las estrellas, pueden obtenerse temperaturas iguales a millones de kelvin. En este caso el espectro térmico de la radiación electromagnética abarcará también los rayos X. Los rayos X llegados del espacio cósmico ayudan a resolver los sugestivos problemas de la astrofísica.

Pasemos ahora a la conversación sobre los picos agudos superpuestos a la curva del espectro continuo.

En lo referente a estos rayos se ha demostrado precisamente la regla inversa, inversa respecto a la ley del espectro continuo. Los puntos en que se encuentran los picos, o sea, sus longitudes de onda, se determinan unívocamente por el material del ánodo. Por esta razón dicha radiación lleva el nombre de característica.

Su origen se explica, de modo no preconcebido, mediante el modelo cuántico del átomo. Los rayos electrónicos del tubo de rayos X son capaces de penetrar en el interior del átomo de la sustancia del ánodo y arrancar a éste electrones que se encuentran en los niveles de energía más bajos. Apenas se libera un nivel bajo a éste pasa alguno de los electrones más alejado del centro del átomo. Tiene lugar la radiación de energía en correspondencia con la ley cuántica principal $E_m - E_n = h\nu$. Para diferentes átomos la disposición de los niveles de energía es distinta. De aquí resulta natural que los espectros que aparecen sean característicos.

Por cuanto las líneas del espectro característico son las más intensas, éstas, precisamente, se utilizan para el análisis estructural por difracción de rayos X. Lo mejor es «tamizar» el espectro continuo, es decir, reflejarlo del cristal monocromador antes de haber obligado a incidir el rayo sobre el cristal que se estudia.

Como quiera que los espectros de diferentes elementos son característicos, resulta que la descomposición del rayo en espectro puede aprovecharse para los fines del análisis químico. Dicho análisis se denomina radioespectral. Se da toda una serie de esferas, por ejemplo, el estudio de los elementos de las tierras raras, en que el análisis estructural por difracción de rayos X es, literalmente, insustituible. Las intensidades de las líneas características espectrales de rayos X permiten determinar, con gran precisión, el contenido porcentual de tal o cual elemento en la mezcla.

Nos resta decir varias palabras sobre los espectros de los rayos gamma. En las condiciones terrestres nos encontramos con los rayos gamma que se engendran durante la desintegración radiactiva de la que hablaremos más tarde. La desintegración radiactiva a veces puede acompañarse —y a veces no— de radiación gamma. Pero, cualquiera que sea el tipo de la desintegración radiactiva, el espectro de la radiación gamma será característico.

Si bien los rayos X característicos surgen cuando el átomo «desciende» desde el nivel de energía superior al inferior, los rayos gamma se engendran como resultado de la transición análoga del núcleo atómico.

Los espectros gamma de las transformaciones radiactivas son bien estudiados. Existen tablas en las cuales se pueden encontrar datos exactos sobre la longitud de onda de los rayos gamma que se engendran durante las transmutaciones alfa o beta de tal o cual isótopo radiactivo.

Radiografía de los materiales

Me veo obligado a repetir reiteradas veces que en lo que se refiere a la terminología los asuntos en la ciencia no van del todo bien. La ciencia avanza a paso tan acelerado que el contenido atribuido a una u otra palabra cambia ante los ojos de una sola generación. Al mismo tiempo, la modificación de la terminología está relacionada con la destrucción de lo acostumbrado. Es imposible eliminar de la circulación los libros viejos. De este modo, lo único que se puede hacer es estipular estrictamente el sentido que se da al término.

Hoy en día, cuando se trata del análisis estructural por difracción de rayos X se tiene en cuenta la investigación de la estructura atómica de los cristales. El objeto del estudio es el monocristal de la sustancia.

Sin embargo, el provecho que se saca del estudio de la estructura con ayuda de los rayos X está lejos de agotarse por la solución de este problema. Los cuadros caracte-

rísticos y ricos en información se obtienen también en el caso de que se toman roentgenogramas de cualesquiera materiales, y no sólo de los cristales unitarios. En estos casos suele utilizarse el término «roentgenografía» o «radiografía».

Si interponemos en el camino del rayo X monocromático un trocito de hoja metálica, entonces, en la placa fotográfica plana aparecerá un sistema de circunferencias concéntricas. Un roentgenograma de este tipo se denomina diagrama de Debye. ¿Cuál es su procedencia?

La mayoría de los cuerpos sólidos consta de pequeños cristales orientados desordenadamente unos respecto a otros. Cuando comienza a solidificarse la masa fundida de cierta sustancia, la cristalización se inicia simultáneamente a partir de un gran número de puntos. Cada pequeño cristal crece «como le da la gana», y este crecimiento se prolonga hasta el momento en que los cristales se encuentren.

En cada uno de los pequeños cristales están presentes los mismos sistemas de planos atómicos. Es que por su estructura los cristales son idénticos. Centremos nuestra atención en uno cualquiera de los sistemas de planos con la distancia interplanar d. La cantidad de los diminutos cristales es ingente (habitualmente, las dimensiones lineales de cristal de un cuerpo sólido, según el orden de su magnitud, son iguales a una diezmilésima de centímetro) y, por supuesto, entre éstos habrá unos cuyos planos forman con el rayo incidente el ángulo θ que satisface la condición de Bragg — Wulff. Cada uno de estos pequeños cristales dará una mancha en la placa fotográfica. La imagen la proporcionarán todos los cristales cuyas normales a los planos forman un cono (fig. 3.5). Siendo así, también los rayos reflejados caerán sobre el cono. La intersección de este cono con la placa fotográfica dará una circunferencia. Al medir los radios de estas circunferencias, al tiempo que conocemos la distancia desde el objeto hasta la placa fotográfica, hallaremos

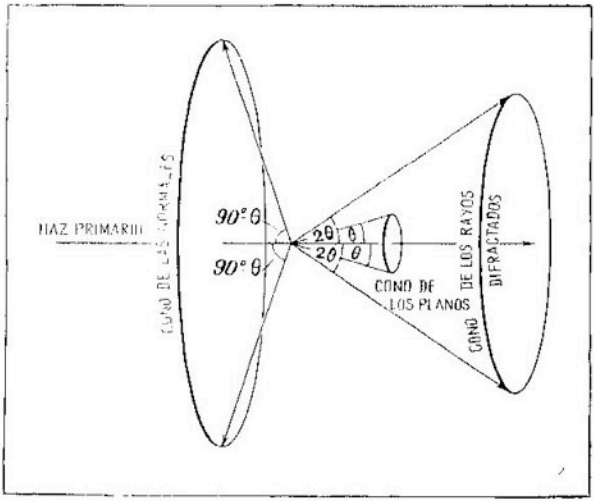


Fig. 3.5.

inmediatamente el ángulo de Bragg θ y podremos calcular por este roentgenograma todas las distancias interplanares de la sustancia.

Valiéndonos de semejante cuadro de difracción distinguiremos, de una vez, una sustancia amorfa de una cristalina. La sustancia amorfa no tiene planos reflectores. Por eso, no veremos en el roentgenograma el sistema de anillos de difracción nítidos. Ahora bien, en la disposición de las moléculas de una sustancia siempre se tiene cierto orden, por la mera razón de que los átomos no pueden «encaramarse» unos a otros. Esta circunstancia, como se puede demostrar mediante cálculos conduce

a que en el roentgenograma de una sustancia amorfa aparece uno o, raras veces, dos anillos borrosos.

Sin embargo, los anillos que observamos en los roentgenogramas nos dan, además, una serie de datos valiosos acerca de la estructura de los materiales: metales, polímeros y compuestos naturales. Si la sustancia está constituida por cristalitos grandes, en este caso el anillo de difracción no será continuo, sino se compondrá de pequeñas manchas aisladas. Si la disposición de los cristalitos no es caótica, sino que éstos están orientados a lo largo de cierto eje o plano, como suele suceder en alambre o chapas metálicos, en hilos polímeros y fibras vegetales, los anillos de difracción nos informarán inmediatamente al respecto. No es difícil comprender que, en el caso de existir orientaciones preferentes de los cristalitos, las reflexiones de los planos atómicos no llenarán el cono de los rayos de una forma continua. En lugar de anillos veremos en el roentgenograma arcos. En el caso de que la orientación es en alto grado perfecta, estos arcos pueden degenerar en manchas pequeñas. Se sobreentiende que una descripción detallada del carácter de la estructura, basándose en el aspecto del roentgenograma, no es, ni mucho menos, un problema tan simple como puede parecer. También en este caso desempeña un papel esencial el método de «pruebas y errores». El investigador inventa modelos de estructura de la sustancia, los cuadros de las reflexiones de los rayos X que deberían dar los modelos ideados por él y, confrontando el cálculo con el experimento, elige el cuadro correcto de la estructura de la sustancia.

En la radiografía de los materiales, de una forma hasta cierto punto convencional, se diferencia la dispersión bajo ángulos grandes y la bajo ángulos pequeños. De la fórmula de Bragg—Wulff que hemos insertado con anterioridad se ve claramente que la dispersión bajo ángulos grandes tiene lugar en el caso de que en la estructura se observa una periodicidad a través de distancias pequeñas, diga-

mos de 3 a 10 Å. En cambio, si los rayos X reflejados (o, también se puede decir, dispersados) presentan un cuadro de difracción que se acumula cerca del rayo primario, entonces, esto significa que la estructura posee una periodicidad a través de distancias grandes.

En metalografía, las más de las veces tenemos que tratar con anillos de difracción dispuestos bajo ángulos grandes por cuanto aquéllos constan de cristalitos. Los átomos de los cristalitos forman redes regulares con celdillas cuyas dimensiones tienen el orden de unidades de angström.

En los casos en que como objeto de investigación figuran sustancias constituidas por macromoléculas —y a éstas pertenece una multitud de sustancias naturales, tales como, por ejemplo, la celulosa o el ADN (ácido desoxirribonucleico), como asimismo sustancias poliméras sintéticas cuyos nombres comerciales: polietileno, nylón, kaprón, etc. conoce perfectamente cualquier lector que ni noción tiene acerca de la química—, en estos casos tenemos que ver con una circunstancia sumamente interesante. A veces, obtendremos roentgenogramas que nos muestran anillos solamente de gran diámetro. En otras palabras, nos encontraremos con la misma dispersión bajo ángulos grandes que en los metales. En otras ocasiones, no descubriremos anillos de gran diámetro, sin embargo, advertiremos la existencia de rayos de difracción que se desviaron tan sólo de modo insignificante de la dirección primaria. Y, por fin, también son posibles casos en que la sustancia manifiesta la dispersión de rayos X tanto bajo ángulos grandes, como bajo pequeños.

Se denomina habitualmente dispersión bajo ángulos pequeños (otra vez repito que la clasificación en dispersión bajo ángulos pequeños y en la bajo ángulos grandes es hasta cierto punto convencional) aquella que abarca el diapasón desde varios minutos hasta 3 ó 4°. Naturalmente, cuanto menos es el ángulo de difracción, tanto

mayor es el período de repetición de los elementos estructurales que crearon esta difracción.

La dispersión bajo ángulos grandes está condicionada por el orden en la disposición de los átomos en el interior de los cristalitos. Y en lo que concierne a la dispersión bajo ángulos pequeños, ésta está relacionada con la disposición ordenada de formaciones bastante grandes que se denominan sobremoleculares. También puede ocurrir que dentro de estas formaciones compuestas de centenares o miles de átomos no existe orden alguno. Pero, si estos sistemas tan grandes forman redes unidimensionales, bidimensionales o bien tridimensionales, entonces, la dispersión de rayos X bajo ángulos pequeños lo pondrá al descubierto. Con el fin de que el lector pueda formar una idea patente al respecto yo le propongo figurar una estructura ordenada de sacos con papas. Reviste un interés excepcional y, probablemente, tiene un profundo sentido la circunstancia de que nos encontramos con semejante orden «de saco» en muchísimos sistemas biológicos. Por ejemplo, las largas moléculas que forman el tejido muscular están dispuestas de una manera tan ordenada como lapiceros de sección circular en un paquete. Como lo demuestra la dispersión de rayos X bajo ángulos pequeños, topamos con la ordenación extraordinariamente alta de este tipo en las membranas de las células, en tales sistemas proteínicos como los virus, etc.

En la teoría de la difracción existe un interesante teorema que no voy a demostrar, pero que, según opino, parecerá natural al lector. Se puede demostrar de una forma rigurosa que el aspecto del cuadro de difracción queda el mismo, si en el objeto que produce la difracción se intercambian de lugar los orificios y los intervalos no transparentes. De vez en cuando, este teorema causa muchas molestias al investigador. Semejante cosa sucede cuando éste, con igual éxito, puede explicar la dispersión de rayos X tanto por los poros en el seno de la sustancia, como por las inclusiones ajenas. El estudio de los poros,

de su tamaño, forma y cantidad por unidad de volumen, reviste gran interés para los prácticos. De estas particularidades de la estructura de las fibras sintéticas depende, en sumo grado, la calidad de su teñido. No es difícil adivinar que una distribución irregular de los poros será causa de su teñido no uniforme. Se obtendrá una tela poco atractiva.

De todo lo expuesto resulta bastante evidente que la radiografía de los materiales no sólo es un método de investigación de la sustancia, sino también método de control técnico de las más diversas producciones.